

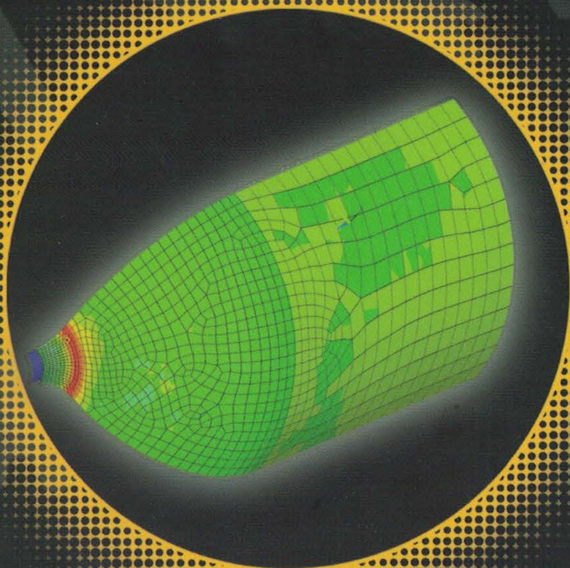
CAD/CAM/CAE工程应用丛书 ANSYS系列

ANSYS Workbench 14.5 数值模拟工程实例解析

张洪才 刘宪伟 孙长青 等编著

本书核心内容包含

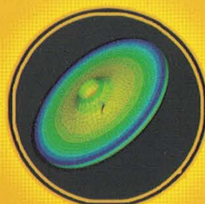
- 爆破片的有限元分析
- 赫兹接触有限元分析
- 薄板多道焊接残余应力有限元分析
- 圆柱体挤压成型非线性有限元分析
- 齿轮动态接触热-结构耦合分析
- 电动机主轴的谐响应分析
- 振动平台的响应谱分析
- 焊接接头的弹塑性分析
- 行星机构的刚-柔瞬态动力学分析
- 轴类零件的应变疲劳分析
- 多盘转子系统动力学分析
- 悬臂梁的直接优化设计
- 点焊结构的有限元分析

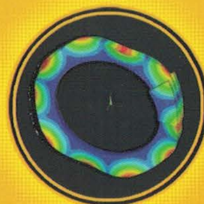




附赠超值 DVD 光盘

范例素材+视频讲解







机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



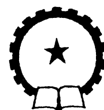
VISIT…

LANZAROTE Caliente.com

CAD/CAM/CAE 工程应用丛书·ANSYS 系列

ANSYS Workbench 14.5 数值模拟工程实例解析

张洪才　刘宪伟　孙长青　等编著



机 械 工 业 出 版 社

本书以 ANSYS 14.5 版本为基础，详细介绍了 ANSYS 经典版和 Workbench 协同仿真平台。讲解了 ANSYS 的几何非线性、材料非线性、界面失效、接触分析、压电分析、热-结构、塑性成型、生死单元和 Workbench 的线弹性静力学分析、非线性分析、模态分析、瞬态动力学分析、谐响应分析、响应谱分析、随机振动分析、流体分析、断裂力学、屈曲分析、刚-柔耦合动态接触分析、疲劳分析、优化设计和点焊结构，全书共 36 个实例，并在配套光盘中提供了 36 个实例的视频教程和实例文件。

本书不仅可以作为高等院校理工类高年级本科生或研究生学习 ANSYS 有限元分析软件的教材，还可作为从事结构分析的工程技术人员的自学参考教材，同时书中提供的大量实例也可供高级用户参考。

图书在版编目（CIP）数据

ANSYS Workbench 14.5 数值模拟工程实例解析 / 张洪才等编著. —北京：机械工业出版社，2013.9
（CAD/CAM/CAE 工程应用丛书 • ANSYS 系列）
ISBN 978-7-111-44013-0

Ⅰ. ①A… Ⅱ. ①张… Ⅲ. ①有限元分析-应用软件 Ⅳ. ①O241.82-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2013）第 216018 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号　邮政编码 100037）
策划编辑：张淑谦
责任编辑：张淑谦
责任印制：杨　曦

北京四季青印刷厂印刷

2013 年 10月第 1 版 • 第 1 次印刷
184mm×260mm • 26 印张 • 641 千字
0001－4000 册
标准书号：ISBN 978-7-111-44013-0
　　　　　ISBN 978-7-89405-094-6（光盘）
定价：72.00 元（含 1DVD）

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务
社服务中心：（010）88361066
销售一部：（010）68326294
销售二部：（010）88379649
读者购书热线：（010）88379203

网络服务
教材网：http://www.cmpedu.com
机工官网：http://www.cmpbook.com
机工官博：http://weibo.com/cmp1952
封面无防伪标均为盗版

出 版 说 明

随着信息技术在各领域的迅速渗透，CAD/CAM/CAE 技术已经得到了广泛的应用，从根本上改变了传统的设计、生产、组织模式，对推动现有企业的技术改造、带动整个产业结构的变革、发展新兴技术、促进经济增长都具有十分重要的意义。

CAD 在机械制造行业的应用最早，使用也最为广泛。目前其最主要的应用涉及到机械、电子、建筑等工程领域。世界各大航空、航天及汽车等制造业巨头不但广泛采用 CAD/CAM/CAE 技术进行产品设计，而且投入大量的人力、物力及资金进行 CAD/CAM/CAE 软件的开发，以保持自己技术上的领先地位和国际市场上的优势。CAD 在工程中的应用，不但可以提高设计质量，缩短工程周期，还可以节约大量建设投资。

各行各业的工程技术人员也逐步认识到 CAD/CAM/CAE 技术在现代工程中的重要性，掌握其中的一种或几种软件的使用方法和技巧，已成为他们在竞争日益激烈的市场经济形势下生存和发展的必备技能之一。然而仅仅知道简单的软件操作方法是远远不够的，只有将计算机技术和工程实际结合起来，才能真正达到通过现代的技术手段提高工程效益的目的。

基于这一考虑，机械工业出版社特别推出了这套主要面向相关行业工程技术人员的“CAD/CAM/CAE 工程应用丛书”。本丛书涉及 AutoCAD、Pro/ENGINEER、CreoUG、SolidWorks、Mastercam、ANSYS 等软件在机械设计、性能分析、制造技术方面的应用，以及 AutoCAD 和天正建筑 CAD 软件在建筑和室内配景图、建筑施工图、室内装潢图、水暖、空调布线图、电路布线图以及建筑总图等方面的应用。

本套丛书立足于基本概念和操作，配以大量具有代表性的实例，并融入了作者丰富的实践经验，使得本丛书内容具有专业性强、操作性强、指导性强的特点，是一套真正具有实用价值的书籍。

机械工业出版社

前　　言

ANSYS 是目前国内外使用最广泛的计算机辅助分析软件之一，经过 40 多年的发展，其强大的求解功能和良好的用户界面深受广大用户的欢迎。ANSYS 软件是一个集结构、热、流体、电磁和声学于一体的大型通用有限元分析软件。同时，它还是世界上第一个通过ISO 9001质量认证的分析设计类软件。ANSYS 软件可广泛应用于核工业、铁道、石油化工、航空航天、机械制造、材料成形、能源、汽车交通、国防军工等工业及科学研究等领域。ANSYS 14.5 是目前最新的 ANSYS 版本，该新版本涉及的内容包括：高级分析、网格划分、优化、多物理场和多体动力学。ANSYS 产品的主体是 ANSYS Workbench，整合了 ANSYS 诸多软件。ANSYS 14.5 不仅为当前的商业应用提供了新技术，而且在以下方面取得了显著进步：继续开发和提供世界一流的求解器技术；提供了针对复杂仿真的多物理场耦合解决方法；整合了 ANSYS 的网格技术并产生统一的网格环境；通过对先进的软硬件平台的支持来实现对大规模问题的高效求解；继续改进最好的 CAE 集成环境——ANSYS Workbench；继续融合先进的计算流体动力学技术。

本书工程实例背景强，讲述循序渐进，应用领域广泛。通过学习，读者可逐步提高自身的 Workbench 操作水平及利用有限元分析理论进行结构分析的能力，最终具备在结构分析领域解决实际工程问题的思路、方法和能力。

全书共 36 个工程实例，覆盖了大部分工程问题，也详细地讲解了一些热门问题，如爆破片分析、齿轮动态接触热-结构耦合、塑性成型、焊接过程模拟、行星机构的刚-柔瞬态动力学分析、应变疲劳分析、非比例加载疲劳分析和转子系统临界转速等问题并配有详细的讲解视频教程，可以帮助读者在短时间内掌握这些复杂问题的分析流程和技巧，同时还能够领会到实际工程问题的分析思路，并能解决相关领域的问题。

本书面向初、中级用户，适合于初、中级用户入门与提高阶段使用。全书主要由长春装甲兵技术学院张洪才、刘宪伟编写，其中第 3～6 例由沈阳工程学院孙长青编写，此外参加本书编写的还有长春装甲兵技术学院的王海鹏、黄健、金顶云、魏建辉、丰吉贺、郑振铎和高嘉英；白城兵器试验中心的蒋陆德；中国北方车辆研究所的邢彦斌。编者长期从事 CAE 的研究工作，并根据自己的研究工作整理完成本书内容。在此，作者向所有参与和关心本书出版的领导、老师、亲人和朋友致以诚挚的谢意！由于水平所限，难免在写作方式和内容上存在疏漏之处，恳请读者批评指正，如有问题可以发邮件到zafansys@163.com，以便能促进技术的提高。

编者

目 录



出版说明
前言
第 1 例 爆破片的有限元分析 …… 1
1.1 实例覆盖的知识点 …… 1
1.2 模型 …… 1
1.3 单元 …… 1
1.4 材料参数 …… 2
1.5 边界条件和载荷 …… 2
1.6 GUI 操作 …… 2
1.6.1 前处理 …… 2
1.6.2 求解 …… 9
1.6.3 后处理 …… 13
1.7 命令流 …… 14
第 2 例 赫兹接触有限元分析 …… 20
2.1 实例覆盖的知识点 …… 20
2.2 模型 …… 20
2.3 单元 …… 20
2.4 材料参数 …… 21
2.5 边界条件和载荷 …… 21
2.6 GUI 操作 …… 21
2.6.1 求解 …… 26
2.6.2 后处理 …… 29
2.7 命令流 …… 30
第 3 例 搭接结构的界面开裂失效模拟 …… 32
3.1 实例覆盖的知识点 …… 32
3.2 模型 …… 32
3.3 单元 …… 32
3.4 材料参数 …… 32
3.5 边界条件和载荷 …… 33
3.6 GUI 操作 …… 33
3.6.1 求解 …… 36
3.6.2 后处理 …… 38
3.7 命令流 …… 40
第 4 例 薄板多道焊接残余应力有限元分析 …… 42
4.1 实例覆盖的知识点 …… 42
4.2 模型 …… 42
4.3 单元 …… 42
4.4 材料参数 …… 43
4.5 边界条件和载荷 …… 43
4.6 GUI 操作 …… 43
4.6.1 前处理 …… 43
4.6.2 求解 …… 50
4.6.3 后处理 …… 56
4.7 命令流 …… 62
第 5 例 含强化纤维的复合材料管道 …… 69
5.1 实例覆盖的知识点 …… 69
5.2 模型 …… 69
5.3 单元 …… 70
5.4 材料参数 …… 70
5.5 边界条件和载荷 …… 70
5.6 GUI 操作 …… 70
5.6.1 前处理 …… 70
5.6.2 求解 …… 76
5.6.3 后处理 …… 78
5.7 命令流 …… 79
第 6 例 埋深管道与土的相互瞬态接触分析 …… 82
6.1 实例覆盖的知识点 …… 82
6.2 模型 …… 82
6.3 单元 …… 83
6.4 材料参数 …… 83

6.5 边界条件和载荷 83
6.6 GUI 操作 83
6.6.1 前处理 83
6.6.2 求解 89
6.6.3 后处理 92
6.7 命令流 95
第 7 例 功能梯度压电梁的有限元分析 98
7.1 实例覆盖的知识点 98
7.2 模型 98
7.3 单元 98
7.4 材料参数 98
7.5 边界条件和载荷 99
7.6 GUI 操作 99
7.6.1 前处理 99
7.6.2 求解 103
7.6.3 后处理 106
7.7 命令流 107
第 8 例 温度对于装配体接触应力影响分析 110
8.1 实例覆盖的知识点 110
8.2 模型 110
8.3 单元 111
8.4 材料参数 111
8.5 边界条件和载荷 111
8.6 GUI 操作 111
8.6.1 前处理 111
8.6.2 求解 117
8.6.3 后处理 120
8.7 命令流 122
第 9 例 基于生死单元法的平板填充焊接温度场分析 125
9.1 实例覆盖的知识点 125
9.2 模型 125
9.3 单元 126
9.4 材料参数 126
9.5 边界条件和载荷 126
9.6 GUI 操作 126
9.6.1 前处理 126
9.6.2 求解 130
9.6.3 后处理 132
9.7 命令流 134
第 10 例 轮-轨接触的有限元分析 137
10.1 实例覆盖的知识点 137
10.2 模型 137
10.3 单元 138
10.4 材料参数 138
10.5 边界条件和载荷 138
10.6 GUI 操作 138
10.6.1 前处理 138
10.6.2 求解 143
10.6.3 后处理 147
10.7 命令流 150
第 11 例 圆柱体挤压成型非线性有限元分析 152
11.1 实例覆盖的知识点 152
11.2 模型 152
11.3 单元 153
11.4 材料参数 153
11.5 边界条件和载荷 153
11.6 GUI 操作 153
11.6.1 前处理 153
11.6.2 求解 157
11.6.3 后处理 160
11.7 命令流 162
第 12 例 齿轮动态接触的热-结构耦合分析 164
12.1 实例覆盖的知识点 164
12.2 模型 164
12.3 单元 165
12.4 材料参数 165
12.5 边界条件和载荷 165
12.6 GUI 操作 165
12.6.1 前处理 165

12.6.2　求解 171
12.6.3　后处理 174
12.7　命令流 176
第 13 例　离合器轮盘的预应力模态分析 179
13.1　实例覆盖的知识点 179
13.2　问题的描述 179
13.2.1　几何模型 179
13.2.2　材料参数 180
13.2.3　边界条件和载荷 180
13.3　GUI 操作 180
13.3.1　建立预应力模态分析系统 180
13.3.2　定义材料数据 180
13.3.3　建立几何模型 180
13.3.4　创建有限元模型 181
13.3.5　静力学求解 182
13.3.6　模态求解 184
第 14 例　气穴分析 186
14.1　实例覆盖的知识点 186
14.2　问题的描述 186
14.2.1　几何模型 186
14.2.2　材料参数 186
14.2.3　边界条件和载荷 186
14.3　GUI 操作 187
14.3.1　创建流体分析系统 187
14.3.2　建立几何模型 187
14.3.3　划分网格 188
14.3.4　流体动力学求解 188
第 15 例　推力轴承承载能力分析 195
15.1　实例覆盖的知识点 195
15.2　问题的描述 195
15.2.1　几何模型 195
15.2.2　材料参数 196
15.2.3　边界条件和载荷 196
15.3　GUI 操作 196
15.3.1　创建流体分析系统 196
15.3.2　建立几何模型 196
15.3.3　划分网格 196
15.3.4　流体动力学求解 197
第 16 例　泵壳的稳态热应力分析 203
16.1　实例覆盖的知识点 203
16.2　问题的描述 203
16.2.1　几何模型 203
16.2.2　材料参数 204
16.2.3　边界条件和载荷 204
16.3　GUI 操作 204
16.3.1　建立稳态热应力分析系统 204
16.3.2　定义材料数据 204
16.3.3　建立几何模型 205
16.3.4　创建有限元模型 206
16.3.5　稳态热分析 207
16.3.6　静力学求解 209
第 17 例　斜齿轮-齿条装配体的模态分析 211
17.1　实例覆盖的知识点 211
17.2　问题的描述 211
17.2.1　几何模型 211
17.2.2　材料参数 211
17.2.3　边界条件和载荷 211
17.3　GUI 操作 212
17.3.1　建立模态分析系统 212
17.3.2　定义材料数据 212
17.3.3　建立几何模型 213
17.3.4　创建有限元模型 213
17.3.5　模态求解 215
第 18 例　电机主轴的谐响应分析 217
18.1　实例覆盖的知识点 217
18.2　问题的描述 217
18.2.1　几何模型 217
18.2.2　材料参数 217
18.2.3　边界条件和载荷 217
18.3　完全法谐响应分析 GUI 操作 218
18.3.1　建立谐响应分析系统 218



18.3.2 定义材料数据 218
18.3.3 建立几何模型 218
18.3.4 创建有限元模型 219
18.3.5 谐响应分析 220
18.4 模态叠加法谐响应分析 GUI 操作 224
18.4.1 建立模态叠加法谐响应分析系统 224
18.4.2 定义材料数据 225
18.4.3 建立几何模型 225
18.4.4 创建有限元模型 225
18.4.5 模态分析 226
18.4.6 谐响应分析 227
18.5 联合 ANSYS 经典版与 WB 进行后处理 230
第 19 例 管道表面椭圆裂纹的断裂力学计算 232
19.1 实例覆盖的知识点 232
19.2 问题的描述 232
19.2.1 几何模型 232
19.2.2 材料参数 232
19.2.3 边界条件和载荷 232
19.3 GUI 操作 233
19.3.1 创建静力学分析系统 233
19.3.2 定义材料数据 233
19.3.3 建立几何模型 234
19.3.4 创建有限元模型 234
19.3.5 静力学求解 237
第 20 例 斜齿轮动态接触瞬态动力学分析 241
20.1 实例覆盖的知识点 241
20.2 问题的描述 241
20.2.1 几何模型 241
20.2.2 材料参数 242
20.2.3 边界条件和载荷 242
20.3 GUI 操作 242
20.3.1 创建瞬态动力学分析系统 242
20.3.2 定义材料数据 242
20.3.3 建立几何模型 243
20.3.4 创建有限元模型 244
20.3.5 瞬态动力学求解 247
第 21 例 振动平台的响应谱分析 251
21.1 实例覆盖的知识点 251
21.2 模型 251
21.2.1 几何模型 251
21.2.2 材料参数 251
21.2.3 边界条件和载荷 251
21.3 GUI 操作 252
21.3.1 创建响应谱分析系统 252
21.3.2 定义材料数据 252
21.3.3 建立几何模型 253
21.3.4 创建有限元模型 253
21.3.5 模态分析 254
21.3.6 响应谱分析 256
第 22 例 齿轮轴的随机振动分析 258
22.1 实例覆盖的知识点 258
22.2 模型 258
22.2.1 几何模型 258
22.2.2 材料参数 258
22.2.3 边界条件和载荷 258
22.3 GUI 操作 259
22.3.1 创建随机振动分析系统 259
22.3.2 定义材料数据 259
22.3.3 建立几何模型 260
22.3.4 创建有限元模型 260
22.3.5 模态分析 261
22.3.6 随机振动分析 263
第 23 例 细长管的线性屈曲分析 266
23.1 实例覆盖的知识点 266
23.2 模型 266
23.2.1 几何模型 266
23.2.2 材料参数 266
23.2.3 边界条件和载荷 266
23.3 GUI 操作 266

23.3.1 创建线性屈曲分析系统 266
23.3.2 定义材料数据 267
23.3.3 建立几何模型 267
23.3.4 创建有限元模型 268
23.3.5 静力学分析 269
23.3.6 线性屈曲分析 271

第 24 例 行星传动机构装配体的静力学分析 272

24.1 实例覆盖的知识点 272
24.2 问题的描述 272
24.2.1 几何模型 272
24.2.2 材料参数 272
24.2.3 边界条件和载荷 273
24.3 GUI 操作 273
24.3.1 创建静力学分析系统 273
24.3.2 定义材料数据 273
24.3.3 建立几何模型 274
24.3.4 创建有限元模型 274
24.3.5 静力学分析 276

第 25 例 锥齿轮工作升温的瞬态热应力分析 279

25.1 实例覆盖的知识点 279
25.2 问题的描述 279
25.2.1 几何模型 279
25.2.2 材料参数 279
25.2.3 边界条件和载荷 280
25.3 GUI 操作 280
25.3.1 创建瞬态热应力分析系统 280
25.3.2 定义材料数据 280
25.3.3 建立几何模型 281
25.3.4 创建有限元模型 281
25.3.5 瞬态热分析 283
25.3.6 瞬态动力学分析 286

第 26 例 焊接接头的弹塑性分析 290

26.1 实例覆盖的知识点 290
26.2 问题的描述 290
26.2.1 几何模型 290
26.2.2 材料参数 290
26.2.3 边界条件和载荷 290
26.3 GUI 操作 291
26.3.1 创建静力学分析系统 291
26.3.2 定义材料数据 291
26.3.3 建立几何模型 292
26.3.4 创建有限元模型 293
26.3.5 静力学分析 296

第 27 例 行星机构的刚-柔耦合动力学分析 300

27.1 实例覆盖的知识点 300
27.2 问题的描述 300
27.2.1 几何模型 300
27.2.2 材料参数 300
27.2.3 边界条件和载荷 300
27.3 GUI 操作 300
27.3.1 创建静力学分析系统 300
27.3.2 定义材料数据 301
27.3.3 建立几何模型 301
27.3.4 创建有限元模型 302
27.3.5 瞬态动力学分析 306

第 28 例 发动机连杆的应力疲劳分析 311

28.1 实例覆盖的知识点 311
28.2 模型 311
28.2.1 几何模型 311
28.2.2 材料参数 311
28.2.3 边界条件和载荷 312
28.3 GUI 操作 312
28.3.1 创建静力学分析系统 312
28.3.2 定义材料数据 312
28.3.3 建立几何模型 314
28.3.4 创建有限元模型 315
28.3.5 静力学分析 316
28.3.6 恒定振幅载荷疲劳分析 318





28.3.7 随机载荷疲劳分析 ··· 321
第 29 例 轴类零件的应变疲劳分析 ··· 324
29.1 实例覆盖的知识点 ··· 324
29.2 模型 ··· 324
29.2.1 几何模型 ··· 324
29.2.2 材料参数 ··· 324
29.2.3 边界条件和载荷 ··· 325
29.3 GUI 操作 ··· 325
29.3.1 创建静力学分析系统 ··· 325
29.3.2 定义材料数据 ··· 325
29.3.3 建立几何模型 ··· 326
29.3.4 创建有限元模型 ··· 326
29.3.5 静力学分析 ··· 327
29.3.6 恒定振幅载荷疲劳分析 ··· 329
29.3.7 随机载荷疲劳分析 ··· 331
第 30 例 带孔钢板的非比例加载疲劳分析 ··· 335
30.1 实例覆盖的知识点 ··· 335
30.2 模型 ··· 335
30.2.1 几何模型 ··· 335
30.2.2 材料参数 ··· 335
30.2.3 边界条件和载荷 ··· 336
30.3 GUI 操作 ··· 336
30.3.1 创建静力学分析系统 ··· 336
30.3.2 定义材料数据 ··· 336
30.3.3 建立几何模型 ··· 337
30.3.4 创建有限元模型 ··· 337
30.3.5 工况 1 静力学分析 ··· 338
30.3.6 工况 2 静力学分析 ··· 340
30.3.7 非比例加载疲劳分析 ··· 341
第 31 例 风载作用于广告牌上的单向流-固耦合分析 ··· 344
31.1 实例覆盖的知识点 ··· 344
31.2 问题的描述 ··· 344
31.2.1 几何模型 ··· 344
31.2.2 固体材料参数 ··· 345
31.2.3 边界条件和载荷 ··· 345
31.3 GUI 操作 ··· 345
31.3.1 创建单向流固耦合分析系统 ··· 345
31.3.2 建立几何模型 ··· 345
31.3.3 划分流体区域网格 ··· 346
31.3.4 流体分析 ··· 347
31.3.5 结构静力学分析 ··· 350
第 32 例 振动橡胶板的双向流-固耦合（CFX） ··· 354
32.1 实例覆盖的知识点 ··· 354
32.2 问题的描述 ··· 354
32.2.1 几何模型 ··· 354
32.2.2 材料参数 ··· 355
32.2.3 边界条件和载荷 ··· 355
32.3 GUI 操作 ··· 355
32.3.1 创建双向流-固耦合分析系统 ··· 355
32.3.2 定义材料数据 ··· 355
32.3.3 建立几何模型 ··· 356
32.3.4 设置瞬态结构动力学 ··· 357
32.3.5 设置流体动力学 ··· 359
第 33 例 振动橡胶板的双向流-固耦合（System Coupling） ··· 366
33.1 实例覆盖的知识点 ··· 366
33.2 问题的描述 ··· 366
33.2.1 几何模型 ··· 366
33.2.2 材料参数 ··· 367
33.2.3 边界条件和载荷 ··· 367
33.3 GUI 操作 ··· 367
33.3.1 创建双向流-固耦合分析系统 ··· 367
33.3.2 定义材料数据 ··· 367
33.3.3 建立几何模型 ··· 368
33.3.4 设置瞬态结构动力学 ··· 369
33.3.5 设置流体动力学 ··· 371
33.3.6 设置系统耦合器 ··· 375

第 34 例　多盘转子系统动力学分析 ······ 378
34.1　实例覆盖的知识点 ······ 378
34.2　问题的描述 ······ 378
34.2.1　几何模型 ······ 378
34.2.2　材料参数 ······ 378
34.2.3　边界条件和载荷 ······ 379
34.3　GUI 操作 ······ 379
34.3.1　建立模态分析系统 ······ 379
34.3.2　定义材料数据 ······ 379
34.3.3　建立几何模型 ······ 380
34.3.4　创建有限元模型 ······ 380
34.3.5　模态求解 ······ 383
第 35 例　悬臂梁的直接优化设计（Direct Optimization） ······ 386
35.1　实例覆盖的知识点 ······ 386
35.2　问题的描述 ······ 386
35.2.1　几何模型 ······ 386
35.2.2　材料参数 ······ 386
35.2.3　边界条件和载荷 ······ 387
35.2.4　优化设计参数设置 ······ 387
35.3　GUI 操作 ······ 387
35.3.1　创建静力学分析系统 ······ 387
35.3.2　定义材料数据 ······ 387
35.3.3　建立几何模型 ······ 388
35.3.4　创建有限元模型 ······ 388
35.3.5　静力学分析 ······ 390
35.3.6　直接优化设计 ······ 391
第 36 例　点焊结构的有限元分析 ······ 397
36.1　实例覆盖的知识点 ······ 397
36.2　问题的描述 ······ 397
36.2.1　几何模型 ······ 397
36.2.2　材料参数 ······ 397
36.2.3　边界条件和载荷 ······ 397
36.3　GUI 操作 ······ 397
36.3.1　创建点焊连接 ······ 397
36.3.2　创建静力学分析系统 ······ 399
36.3.3　定义材料数据 ······ 399
36.3.4　创建有限元模型 ······ 400
36.3.5　静力学分析 ······ 401





第 1 例　爆破片的有限元分析

1.1　实例覆盖的知识点

读者通过学习该实例可以掌握如下 ANSYS 的知识点：

1）静力学分析的基本流程。

2）定义材料的多线性等向强化模型的应力–应变关系方法。

3）建立非均匀壳体模型的方法。

4）写入求解载荷文件的方法。

5）使用多载荷文件求解的方法。

1.2　模型

图 1-1 给出了刻槽型爆破片模型，爆破片的承压面投影直径为 d =0.032m，爆破片初始厚度 $s_0 = -0.4$mm，刻槽后剩余厚度 s_c =0.24mm，槽宽度为 $s = 2\times(s_0 - s_c)$，未贯穿区域宽度 B =3mm，槽端部距离 B_1 =20mm。

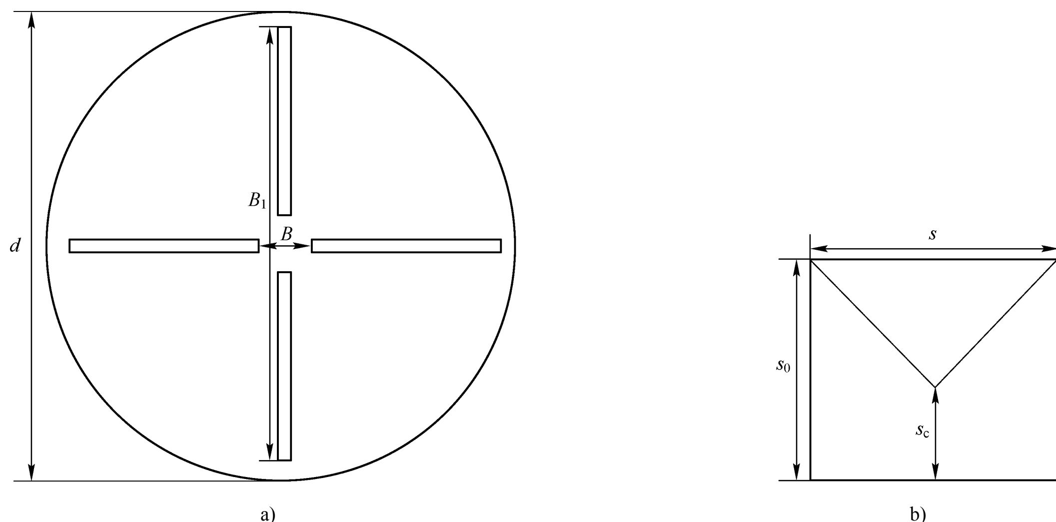


图 1-1　刻槽型爆破片模型

a) 爆破片的俯视图　b) 爆破片刻痕的模型示意图

1.3　单元

本实例选用 4 节点 SHELL181 壳体单元。

1.4 材料参数

从现有文献得知，按准静态分析时，多数金属的应力-应变关系符合幂率关系：

$$\sigma_e = A\varepsilon_e^n \tag{1-1}$$

式中，A 和 n 分别代表材料的强度系数和应变强化指数，计算时采用此式子模拟爆破片材料的本构关系。计算中材料采用 316L，其弹性模量为 1.93E11Pa，泊松比为 0.3，强度系数 A 取 1290MPa，强化指数 n 取 0.370。

1.5 边界条件和载荷

本例暂不考虑压边的影响，因此假定压边完全固定，预拱压力 $p = 10\text{MPa}$ 。

1.6 GUI 操作

1.6.1 前处理

1．定义文件名

GUI：Utility Menu→File→Change Jobname，弹出一个对话框，在输入栏中输入“Rupture disc”，单击“OK”按钮。

2．定义参数

在命令输入窗口中输入 d=32E-3，s0=0.4E-3，sc=0.24E-3，B=3E-3 和 B1=20E-3

3．选择单元

（1）定义单元

GUI：Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete，弹出对话框，单击“Add”按钮，在弹出对话框的左边选择“Shell”选项，然后在右边选择“3D 4node 181”单元，单击“Apply”按钮，继续在对话框左边选择“Shell”选项，然在右边选择“3D 4node 181”选项单元，单击“OK”按钮。

（2）设置单元关键字

在单元类型对话框中选择“Type 1 SHELL181”选项。然后选择“Options”选项，在弹出的对话框中设置“Integration”为“Full w/incompatible”，单击“OK”按钮；返回单元类型界面，继续选择单元类型对话框中“Type 2 SHELL181”选项，然后选择“Options”选项，在弹出的对话框中设置“Integration”为“Full w/incompatible”，单击“OK”按钮；返回单元类型界面，然后单击“Close”按钮关闭对话框。

4．定义材料模型

GUI：Main Menu→Preprocessor→Material Props→Material Models，弹出一个对话框，单击 Structural→Linear→Elastic→Isotropic，弹出图 1-2 所示“各向同性线弹性材料”定义面板，输入弹性模量 EX 为“1.93E11”，泊松比 PRXY 为“0.3”，单击“OK”按钮。关闭对话框，继续单击 Structural→Nonlinear→Inelastic→Rate Independent→Isotropic Hardening

Plasticity→Mises Plasticity→Multilinear，弹出图 1-3 所示的“多线性各向同性材料模型”定义面板，选择“Stress-Strain Options（应力-应变关系）”为“Stress versus Total Strain（应力-总应变）”，连续单击“添加数据点”（Add Point）按钮 11 次，按照图 1-3 输入应力和应变数据点。用户在输入第一个应变与应力数据点时，必须保存该应力与应变的比值等于输入的弹性模量。其他的应变点，可任意选取，然后根据式（1-1），计算出对应的应力，进行数据输入，单击“Graph”按钮，弹出如图 1-4 所示的多线性等向强化模型应力-应变曲线。

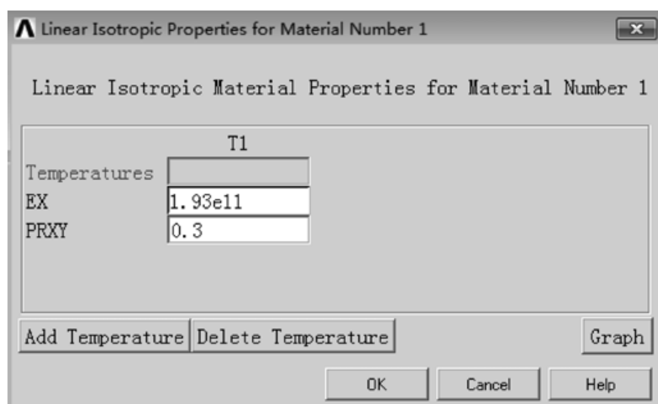


图 1-2 “各向同性线弹性材料”定义面板

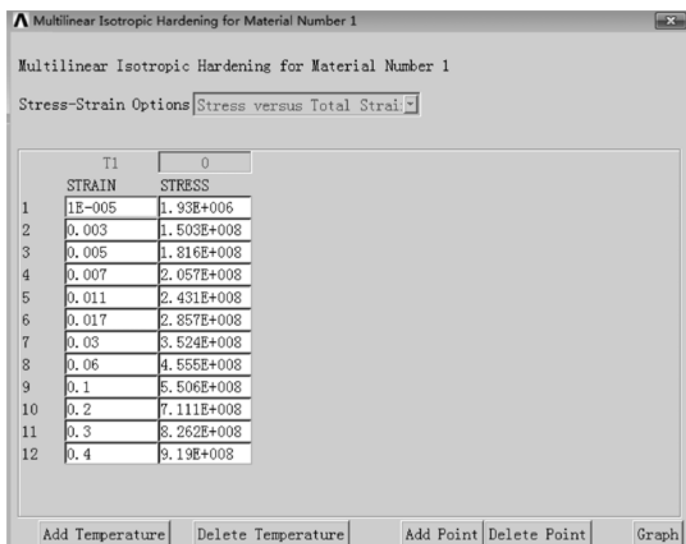


图 1-3 “各向同性等向强化模型”设置面板

5．定义爆破片截面

（1）定义厚度函数

GUI：Utility Menu→Parameters→Functions→Refine/Edit，弹出图 1-5 所示的函数编辑器面板，按照图 1-5 所示输入函数表达式，然后单击 File→SAVE，在弹出的保存文件对话框中输入函数名为“CK1”，单击“保存”按钮。然后重新输入函数表达式为 SC-{Y}，然后单

击 File→SAVE，在弹出的保存文件对话框中输入函数名为“CK2”，单击“保存”按钮。重新输入函数表达式为 SC+{X}，然后单击 File→SAVE，在弹出的保存文件对话框中输入函数名为“CK3”，单击“保存”按钮。重新输入函数表达式为 SC−{X}，然后单击 File→SAVE，在弹出的保存文件对话框中输入函数名为“CK4”，单击“保存”按钮。

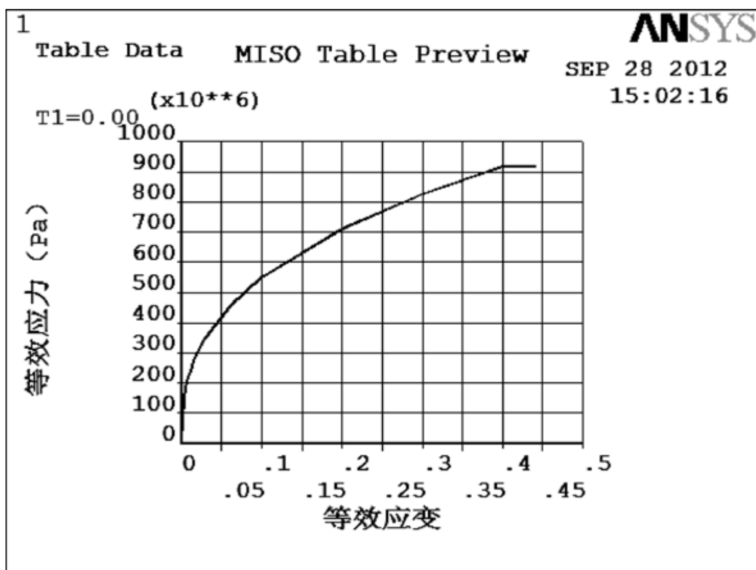


图 1-4　多线性等向强化模型应力-应变曲线

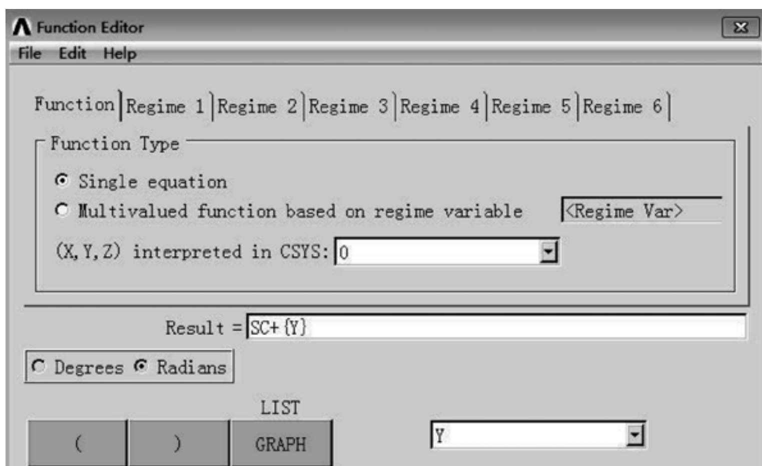


图 1-5　函数编辑器面板

（2）读入厚度函数

GUI：Utility Menu→Parameters→Functions→Read File，弹出输入函数文件对话框，选择刚保存的“CK1”文件，单击“打开”按钮，弹出如图 1-6 所示的“函数加载器设置”面板，输入“表格参数名（Table parameter name）”为“CK1”，输入函数中的“SC”为“SC”，输入完毕后单击“OK”按钮。重复以上过程，将表格参数名分别设为“CK2”“CK3”和“CK4”。

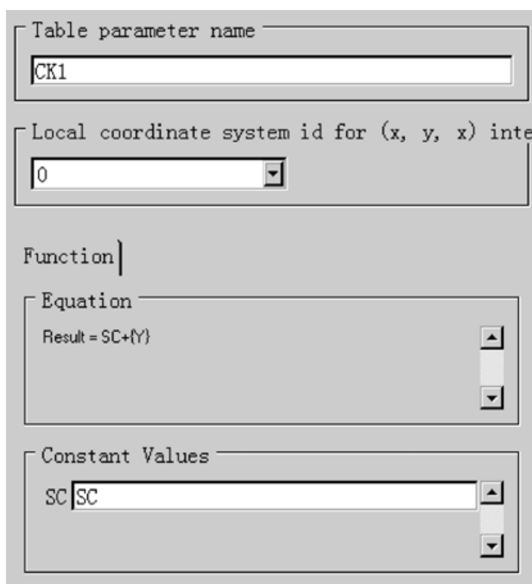


图 1-6 “函数加载器设置”面板

（3）定义变截面壳体

GUI：Main Menu→Preprocessor→Sections→Shell→Lay-up→Add/Edit，弹出如图 1-7 所示的“创建和修改壳体截面”面板，设置“Section Offset”为“Bottom-Plane”，设置“Section Function”为“CK1”，因为是变厚度的截面，所以设置“Integration Pts”为“3”，其他保持默认，单击“OK”按钮。重复以上过程，分别设置 ID 为“2”“3”和“4”与对应的截面函数“CK2”“CK3”和“CK4”。

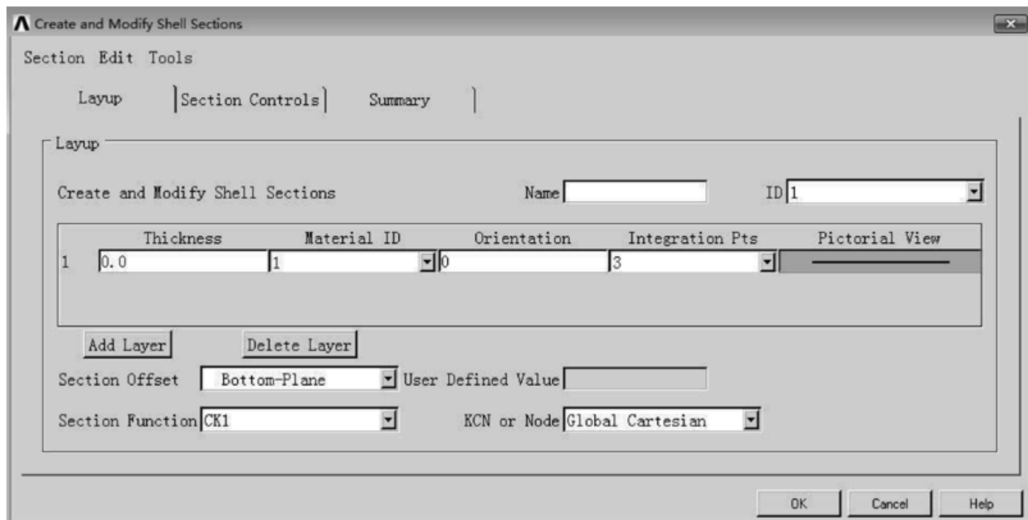


图 1-7 “创建和修改壳体截面”面板

（4）定义等厚度截面壳体

GUI：Main Menu→Preprocessor→Sections→Shell→Lay-up→Add/Edit，弹出如图 1-8 所

示的“创建和修改壳体截面”面板，设置“Section Offset”为“Bottom-Plane”，设置“Section Function”为“None”，设置“Integration Pts”为“3”，“Thickness”为“S0”，ID 号为“5”，其他保持默认，单击“OK”按钮。

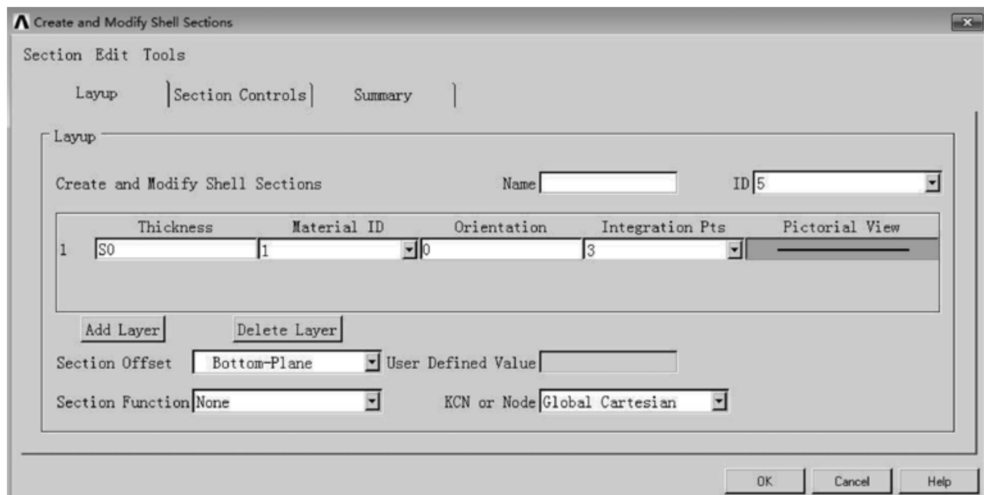


图 1-8 “创建和修改壳体截面”面板

6．建立模型

（1）建立矩形

GUI：Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Rectangle→By Dimensions，弹出如图 1-9 所示的“通过尺寸创建矩形”设置面板，按照图 1-9 进行输入，单击“Apply”按钮，然后继续输入 X1=B/2，X2=B1/2，Y1=- (S0-SC)，Y2=0，单击“OK”按钮。

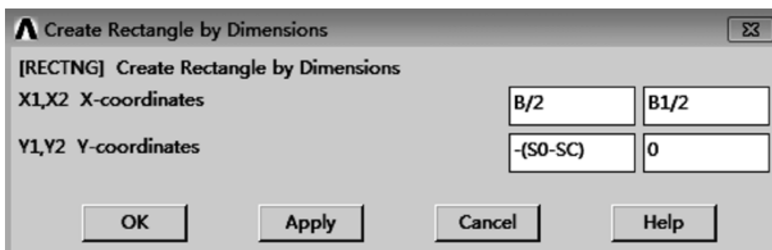


图 1-9 “通过尺寸创建矩形”设置面板

（2）激活柱坐标系

GUI：Utility Menu→WorkPlane→Change Active CS to→Global Cylindrical。

（3）复制矩形

本实例使用循环命令进行复制矩形的操作，命令流如下：

```
*DO,I,1,4,1
AGEN,2,1, , , ,360/4*I, , ,0
AGEN,2,2, , , ,360/4*I, , ,0
*ENDDO
```

（4）搭接所有的面

GUI：Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Overlap→Areas，弹出拾取对话框，单击“Pick All”按钮。

（5）建立圆形

GUI：Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Circle→By Dimensions，弹出如图 1-10 所示的“通过尺寸创建圆面”设置面板，按照图 1-10 进行输入，单击“OK”按钮。

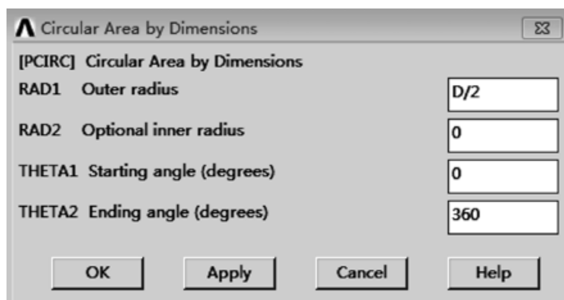


图 1-10 “通过尺寸创建圆面”设置面板

（6）搭接所有的面

GUI：Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Overlap→Areas，弹出拾取对话框，单击“Pick All”按钮。

7．划分网格

（1）打开网格划分工具

GUI：Main Menu→Preprocessor→Meshing→MeshTool。

（2）设置总体网格尺寸

单击网格划分工具中“Size Controls”中总体控制中“Set”按钮，弹出总体网尺寸设置面板，在“Element edge length”中输入“(S0-SC)/2”，单击“OK”按钮。

（3）设置网格属性

单击网格划分工具中“Element Attributes”中的“Set”按钮，弹出如图 1-11 所示的“网格属性”设置面板，设置“Section number”为“1”，其他保持默认，单击“OK”按钮。

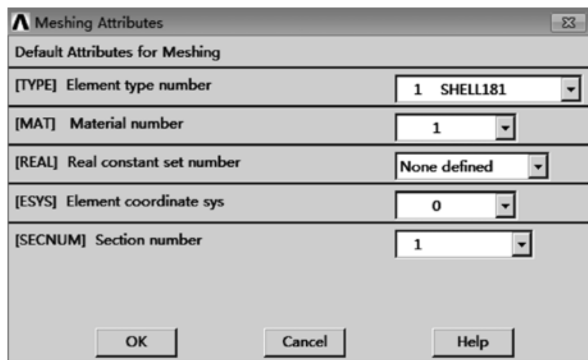


图 1-11 “网格属性”设置面板

（4）进行网格划分

选择网格划分工具面板上的“Mesh”按钮，弹出“拾取”对话框，拾取面 11 和面 5，单击“OK”按钮。

（5）设置网格属性

单击网格划分工具中“Element Attributes”中的“Set”按钮，弹出如图 1-11 所示的网格属性设置面板，设置“Section number”为“2”，其他保持默认，单击“OK”按钮。

（6）进行网格划分

选择网格划分工具面板上的“Mesh”按钮，弹出“拾取”对话框，拾取面 1 和面 13，单击“OK”按钮。

（7）设置网格属性

单击网格划分工具中“Element Attributes”中的“Set”按钮，弹出如图 1-11 所示的网格属性设置面板，设置“Section number”为“3”，其他保持默认，单击“OK”按钮。

（8）进行网格划分

选择网格划分工具面板上的“Mesh”按钮，弹出拾取对话框，拾取面 3 和面 14，单击“OK”按钮。

（9）设置网格属性

单击网格划分工具中“Element Attributes”中的“Set”按钮，弹出如图 1-11 所示的“网格属性”设置面板，设置“Section number”为“4”，其他保持默认，单击“OK”按钮。

（10）进行网格划分

选择网格划分工具面板上的“Mesh”按钮，弹出“拾取”对话框，拾取面 12 和面 7，单击“OK”按钮。

（11）设置网格属性

单击网格划分工具中“Element Attributes”中的“Set”按钮，弹出如图 1-11 所示的“网格属性”设置面板，设置单元类型为“2 Shell181”，设置“Section number”为“5”，其他保持默认，单击“OK”按钮。

（12）设置总体网格尺寸

单击网格划分工具中“Size Controls”中的总体控制中“Set”按钮，弹出如图 1-11 所示的“网格属性”设置面板，在单元尺寸中输入“0”，单击“OK”按钮。

（13）激活智能网格划分

勾选网格划分工具面板上的“Smart Size”，设置网格精细度为“3”。

（14）进行网格划分

单击网格划分工具面板上的“Mesh”按钮，弹出“拾取”对话框，拾取面 4，单击“OK”按钮。

（15）观察变厚度有限元模型

1）设置显示单元

GUI：Utility Menu→PlotCtrls→Style→Size and Shape，弹出如图 1-12 所示的“单元尺寸和形状”设置面板，将显示单元一项后面打勾，单击“OK”按钮。

2）显示单元

GUI：Utility Menu→Plot→Elements，显示如图 1-13 所示的变截面爆破片的有限元模

型，由图可知爆破片的截面变化规律与之前输入的函数变化完全一致。

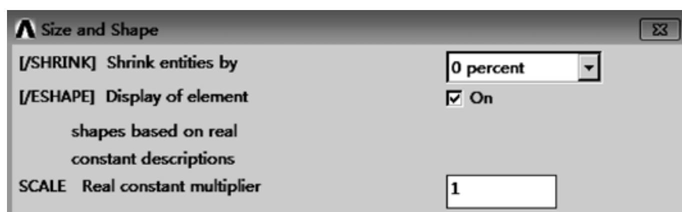


图 1-12 “单元尺寸和形状”设置面板

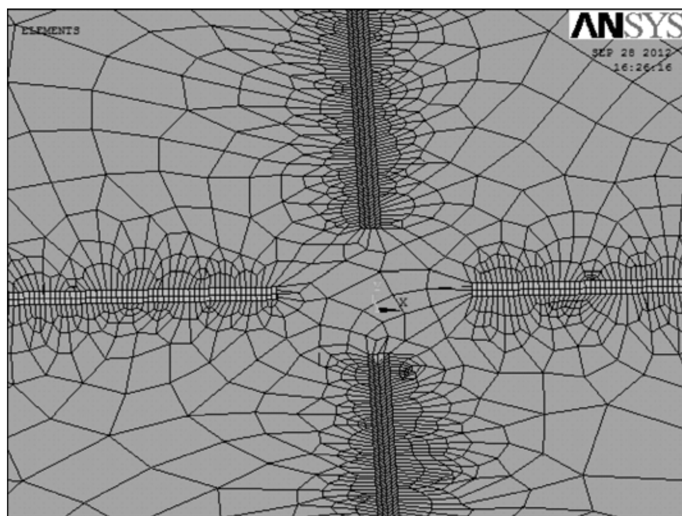


图 1-13 变截面爆破片的有限元模型

1.6.2 求解

1．设置分析类型

（1）激活静力学分析

GUI：Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis，弹出如图 1-14 所示的“分析类型”设置面板，选择“Static”选项，单击“OK”按钮。

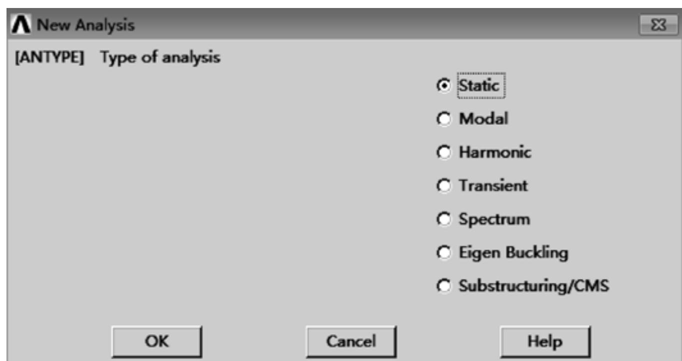


图 1-14 “分析类型”设置面板

（2）设置分析选项

GUI：Main Menu→Preprocessor→Loads→Analysis Type→Analysis Options，弹出如图 1-15 所示的“静态分析选项”设置面板，勾选“Large deform effects”复选框，激活大变形分析，其他设置选择默认设置，单击“OK”按钮。

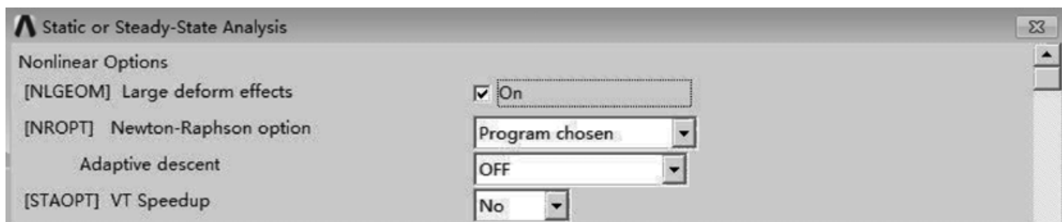


图 1-15 “静态分析选项”设置面板

2．定义边界条件

GUI：Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Lines，弹出拾取对话框，拾取线 L5，L8，L13 和 L6，单击“OK”按钮，弹出图 1-16 所示的“在线上施加约束”面板，选择约束类型为“ALL”，单击“OK”按钮。

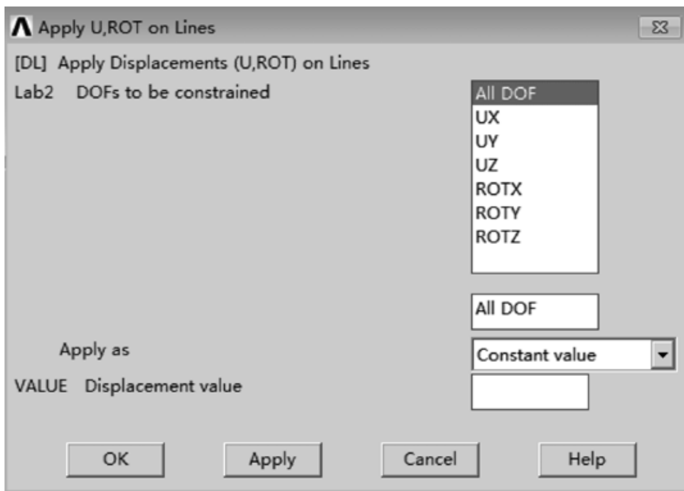


图 1-16 “在线上施加约束”面板

3．写入第一个载荷文件

（1）定义载荷

GUI：Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Pressure→On Areas，弹出拾取对话框，拾取面 4，单击“OK”按钮，弹出如图 1-17 所示的“在面上施加压力”设置面板，设置“Load PRES value”为“10E6”，“Load key usually face no”为“1”，单击“OK”按钮。

（2）输出控制

GUI：Main Menu→Solution→Load Step Opts→Output Ctrls→DB/Results File，弹出图 1-18 所示的“计算结果输出”控制面板，选择“Every substep”选项，单击“OK”按钮。

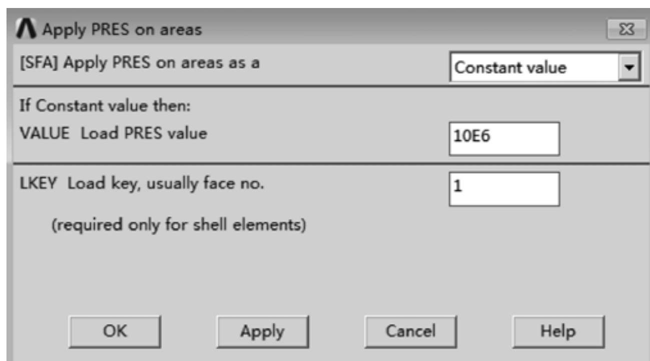


图 1-17 “在面上施加压力”设置面板

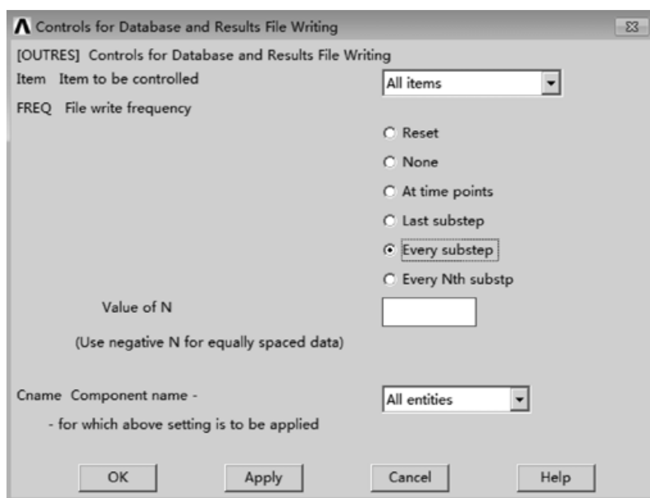


图 1-18 “计算结果输出”控制面

（3）设置计算时间和子步

GUI：Main Menu→Solution→Load Step Opts→Time/Frequence→Time and Substeps，弹出如图 1-19 所示的“时间和子步选项”设置面板，“Time at end of Load Step”设为“1”，“Number of substeps”设为“400”，“Stepped or ramped b.c”选择“Ramped”选项，“Automatic time stepping”设为“ON”，其他保持默认设置，单击“OK”按钮。



图 1-19 “时间和子步选项”设置面板

（4）写入载荷步

GUI：Main Menu→Solution→Load Step Opts→Write LS File，弹出如图 1-20 所示的“写入载荷步文件”面板，“Load step file number n”设为“1”，单击“OK”按钮。

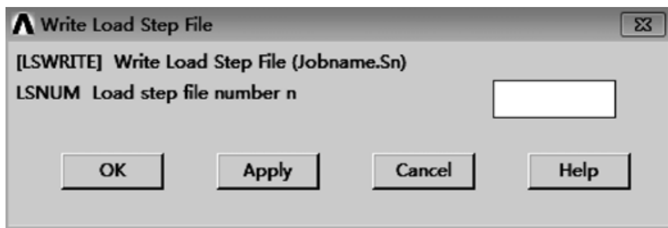


图 1-20 “写入载荷步文件”面板

4．写入第二个载荷文件

（1）定义载荷

GUI：Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Pressure→On Areas，弹出“拾取”对话框，拾取面 4，单击“OK”按钮，弹出如图 1-17 所示的“在面上施加压力”设置面板，“Load PRES value”设为“0”，“Load key usually face no”设为“1”，单击“OK”按钮。

（2）设置计算时间和子步

GUI：Main Menu→Solution→Load Step Opts→Time/Frequence→Time and Substeps，弹出如图 1-19 所示的“时间和子步选项”设置面板，“Time at end of load step”设为“2”，“Number of substeps”设为“200”，“Stepped or ramped b.c”选择“Stepped”，“Automatic time stepping”选择“ON”，其他保持默认设置，单击“OK”按钮。

（3）写入载荷步

GUI：Main Menu→Solution→Load Step Opts→Write LS File，弹出如图 1-20 所示的“写入载荷步文件”面板，“Load step file number n”设为“2”，单击“OK”按钮。

5．写入第三个载荷文件

（1）定义载荷

GUI：Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Pressure→On Areas，弹出“拾取”对话框，拾取面 4，单击“OK”按钮，弹出如图 1-17 所示的“在面上施加压力”设置面板，“Load PRES value”设为“10E6”，“Load key usually face no”设为“1”，单击“OK”按钮。

（2）设置计算时间和子步

GUI：Main Menu→Solution→Load Step Opts→Time/Frequence→Time and Substeps，弹出如图 1-19 所示的“时间和子步选项”设置面板，“Time at end of load step”设为“3”，“Number of substeps”设为“600”，“Stepped or ramped b.c”选择“Ramped”，“Automatic time stepping”选择“ON”，其他保持默认设置，单击“OK”按钮。

（3）写入载荷步

GUI：Main Menu→Solution→Load Step Opts→Write LS File，弹出如图 1-20 所示的“写入载荷步文件”面板，“Load Step file number n”设为“3”，单击“OK”按钮。

6．求解

GUI：Main Menu→Solution→Solve→From LS Files，弹出如图 1-21 所示的“通过载荷步求解”设置面板，“Starting LS file number”设为“1”，“Ending LS file number”设为“3”，“File number in crement”设为“1”，单击“OK”按钮。

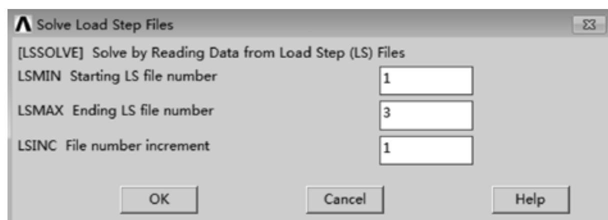


图 1-21 “通过载荷步求解”设置面板

1.6.3 后处理

图 1-22～图 1-27 分别给出了载荷步 1～载荷步 3 作用下的爆破片等效应力与等效塑性应变云图，图 1-28 和图 1-29 分别给出了 4203 节点处 Z 方向位移，等效应力与载荷步的关系，具体查看方法，用户可以参见本章的视频教程。

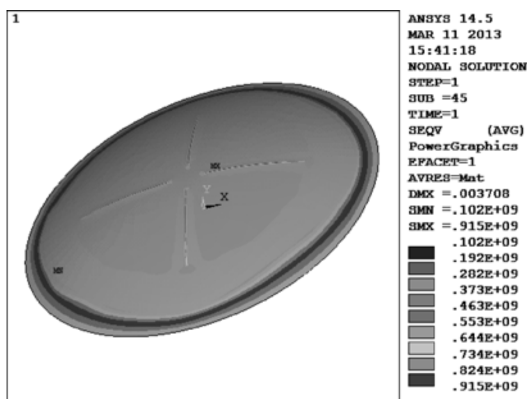


图 1-22 第一个载荷施加完后的等效应力云图

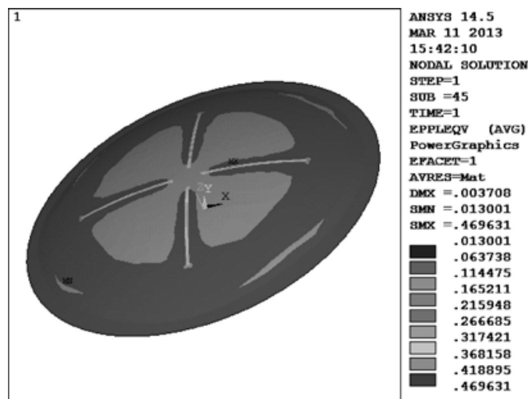


图 1-23 第一个载荷施加完后的等效塑性应变

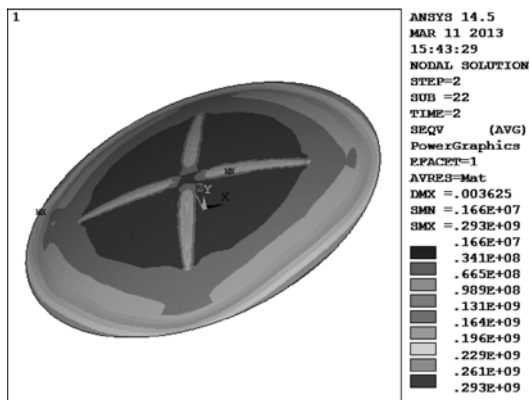


图 1-24 第二个载荷施加完后的等效应力云图

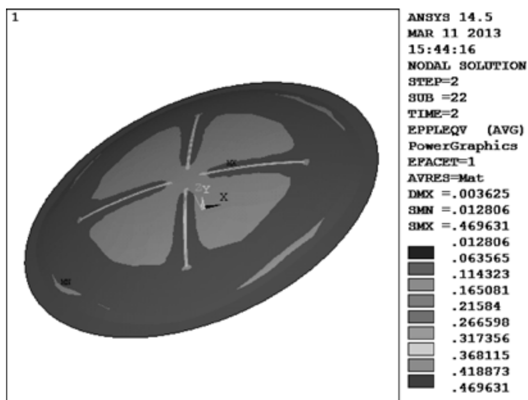


图 1-25 第二个载荷施加完后的等效塑性应变



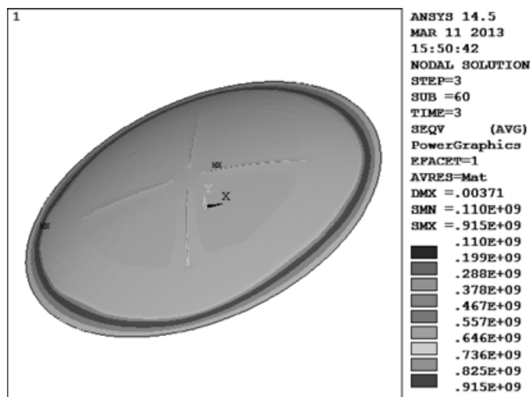


图 1-26　第三个载荷施加完后的等效应力云图

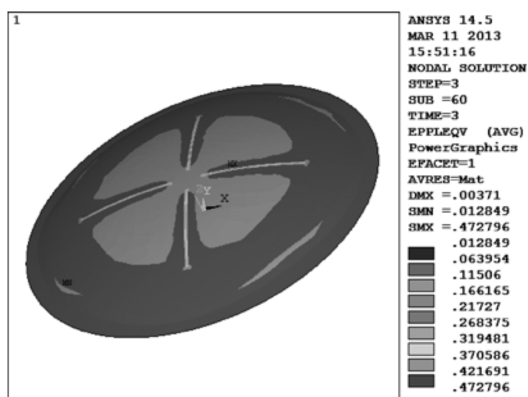


图 1-27　第三个载荷施加完后的等效塑性应变

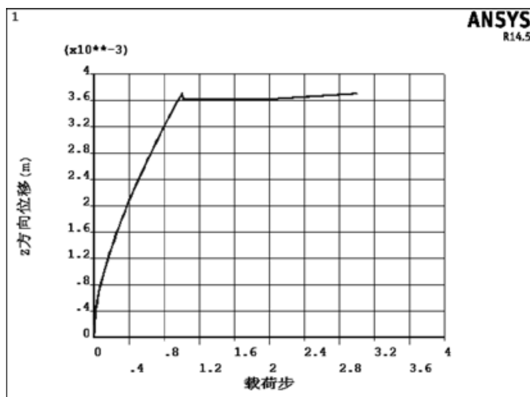


图 1-28　4203 节点处 Z 方向位移与载荷步的关系

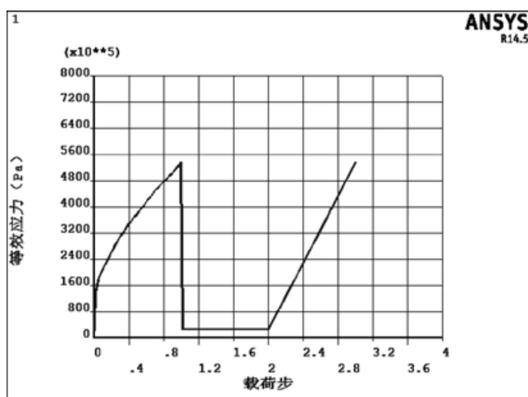


图 1-29　2809 单元中 4203 节点处等效应力与载荷步关系

1.7　命令流

```
/FILNAME,RUPTURE DISC,0
!进入前处理
/PREP7
!定义爆破片的几何参数
D=32E-3
S0=0.4E-3
SC=0.24E-3
B=3E-3
B1=20E-3
ET,1,SHELL181 !定义单元
KEYOPT,1,3,2    !设置单元关键字
ET,2,SHELL181
KEYOPT,2,3,2
!定义爆破片的材料参数
MPTEMP,,,,,,,,
```



```
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,1,,1.93E11
MPDATA,PRXY,1,,0.3
TB,MISO,1,1,13,0
TBTEMP,0
TBPT,,0,0
TBPT,,0.00001,1.93E6
TBPT,,0.003,150.3E6
TBPT,,0.005,181.6E6
TBPT,,0.007,205.7E6
TBPT,,0.011,243.1E6
TBPT,,0.017,285.7E6
TBPT,,0.03,352.4E6
TBPT,,0.06,455.5E6
TBPT,,0.1,550.6E6
TBPT,,0.2,711.1E6
TBPT,,0.3,826.2E6
TBPT,,0.4,919E6
!定义爆破片截面函数
*DEL,_FNCNAME
*DEL,_FNCMTID
*DEL,_FNC_C1
*DEL,_FNCCSYS
*SET,_FNCNAME,'CK1'
*DIM,_FNC_C1,,1
*SET,_FNC_C1(1),SC
*SET,_FNCCSYS,0
! /INPUT,WW.FUNC,,,1
*DIM,%_FNCNAME%,TABLE,6,3,1,,,,%_FNCCSYS%
!
! BEGIN OF EQUATION: SC+{Y}
*SET,%_FNCNAME%(0,0,1), 0.0, -999
*SET,%_FNCNAME%(2,0,1), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(3,0,1), %_FNC_C1(1)%
*SET,%_FNCNAME%(4,0,1), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(5,0,1), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(6,0,1), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(0,1,1), 1.0, -1, 0, 1, 17, 1, 3
*SET,%_FNCNAME%(0,2,1), 0.0, 99, 0, 1, -1, 0, 0
*SET,%_FNCNAME%(0,3,1),     0
! END OF EQUATION: SC+{Y}

*DEL,_FNCNAME
*DEL,_FNCMTID
*DEL,_FNC_C1
*DEL,_FNCCSYS
```

```
*SET,_FNCNAME,'CK2'
*DIM,_FNC_C1,,1
*SET,_FNC_C1(1),SC
*SET,_FNCCSYS,0
! /INPUT,WW.FUNC,,,1
*DIM,%_FNCNAME%,TABLE,6,3,1,,,,%_FNCCSYS%
!
! BEGIN OF EQUATION: SC−{Y}
*SET,%_FNCNAME%(0,0,1), 0.0, −999
*SET,%_FNCNAME%(2,0,1), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(3,0,1), %_FNC_C1(1)%
*SET,%_FNCNAME%(4,0,1), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(5,0,1), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(6,0,1), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(0,1,1), 1.0, −1, 0, 1, 17, 2, 3
*SET,%_FNCNAME%(0,2,1), 0.0, 99, 0, 1, −1, 0, 0
*SET,%_FNCNAME%(0,3,1),     0
! END OF EQUATION: SC−{Y}

*DEL,_FNCNAME
*DEL,_FNCMTID
*DEL,_FNC_C1
*DEL,_FNCCSYS
*SET,_FNCNAME,'CK3'
*DIM,_FNC_C1,,1
*SET,_FNC_C1(1),SC
*SET,_FNCCSYS,0
! /INPUT,WW.FUNC,,,1
*DIM,%_FNCNAME%,TABLE,6,3,1,,,,%_FNCCSYS%
!
! BEGIN OF EQUATION: SC+{X}
*SET,%_FNCNAME%(0,0,1), 0.0, −999
*SET,%_FNCNAME%(2,0,1), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(3,0,1), %_FNC_C1(1)%
*SET,%_FNCNAME%(4,0,1), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(5,0,1), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(6,0,1), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(0,1,1), 1.0, −1, 0, 1, 17, 1, 2
*SET,%_FNCNAME%(0,2,1), 0.0, 99, 0, 1, −1, 0, 0
*SET,%_FNCNAME%(0,3,1),     0
! END OF EQUATION: SC+{X}

*DEL,_FNCNAME
*DEL,_FNCMTID
*DEL,_FNC_C1
*DEL,_FNCCSYS
```



```
*SET,_FNCNAME,'CK4'
*DIM,_FNC_C1,,1
*SET,_FNC_C1(1),SC
*SET,_FNCCSYS,0
! /INPUT,WW.FUNC,,,1
*DIM,%_FNCNAME%,TABLE,6,3,1,,,,%_FNCCSYS%
!
! BEGIN OF EQUATION: SC-{X}
*SET,%_FNCNAME%(0,0,1), 0.0, -999
*SET,%_FNCNAME%(2,0,1), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(3,0,1), %_FNC_C1(1)%
*SET,%_FNCNAME%(4,0,1), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(5,0,1), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(6,0,1), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(0,1,1), 1.0, -1, 0, 1, 17, 2, 2
*SET,%_FNCNAME%(0,2,1), 0.0, 99, 0, 1, -1, 0, 0
*SET,%_FNCNAME%(0,3,1),     0
! END OF EQUATION: SC-{X}
!定义壳体单元截面
SECT,1,SHELL,,
SECDATA, 0.0,1,0.0,3
SECOFFSET,BOT
SECF,%CK1%,     0
SECCONTROL,,,, , , ,

SECT,2,SHELL,,
SECDATA, 0.0,1,0.0,3
SECOFFSET,BOT
SECF,%CK2%,     0
SECCONTROL,,,, , , ,

SECT,3,SHELL,,
SECDATA, 0.0,1,0.0,3
SECOFFSET,BOT
SECF,%CK3%,     0
SECCONTROL,,,, , , ,

SECT,4,SHELL,,
SECDATA, 0.0,1,0.0,3
SECOFFSET,BOT
SECF,%CK4%,     0
SECCONTROL,,,, , , ,

SECT,5,SHELL,,
SECDATA, S0,1,0,3
SECOFFSET,BOT
```

```
SECCONTROL,0,0,0, 0, 1, 1, 1
!建立几何模型
RECTNG,B/2,B1/2, -(S0-SC),0,
RECTNG,B/2,B1/2,0,(S0-SC),
CSYS,1
*DO,I,1,4,1
AGEN,2,1, , , ,360/4*I, , ,0
AGEN,2,2, , , ,360/4*I, , ,0
*ENDDO
AOVLAP,ALL
CSYS,0
PCIRC,D/2,0,0,360,
AOVLAP,ALL
!划分网格
ESIZE,(S0-SC)/2,0,
SECNUM,1
AMESH,11
AMESH,5

SECNUM,2
AMESH,1
AMESH,13
SECNUM,3
AMESH,3
AMESH,14
SECNUM,4
AMESH,12
AMESH,7
SECNUM,5
ESIZE,0,0,
SMRT,3
TYPE,2
AMESH,4
!进入求解器
/SOL
ANTYPE,0 !激活静力学分析
NLGEOM,1 !激活大变形
!定义边界条件
DL,5, ,ALL,
DL,8, ,ALL,
DL,13, ,ALL,
DL,6, ,ALL,
!定义第一个载荷文件
SFA,4,1,PRES,10E6
OUTRES,ALL,ALL,
TIME,1
```

```
AUTOTS,1
NSUBST,400,,,1
KBC,0
TSRES,ERASE
LSWRITE,1,
!定义第二个载荷文件
SFA,4,1,PRES,0
TIME,2
KBC,1
NSUBST,200,,,1
LSWRITE,2,
!定义第三个载荷文件
SFA,4,1,PRES,10E6
TIME,3
AUTOTS,1
NSUBST,600,,,1
KBC,0
LSWRITE,3,
LSSOLVE,1,3,1 !使用多步载荷文件求解
```



第 2 例　赫兹接触有限元分析

2.1　实例覆盖的知识点

读者通过学习该实例可以掌握如下 ANSYS 的知识点。

1）静力学分析的基本步骤。

2）使用接触向导创建接触对的方法。

3）判断接触的正确法线。

4）网格划分控制。

5）激活大变形的方法。

6）施加对称边界的方法。

7）查看接触压力的方法。

2.2　模型

图 2-1 给出了赫兹接触分析的力学模型，该模型为一个轴对称模型，几何参数如图 2-1 所示，单位为 m。

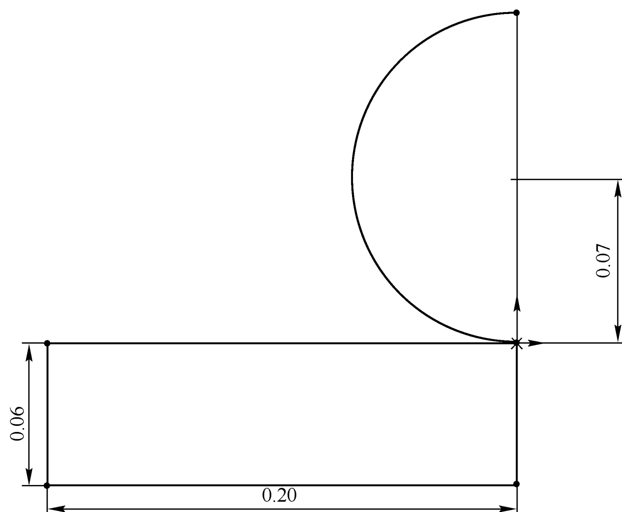


图 2-1　赫兹接触的分析模型

2.3　单元

本实例选用 8 节点 PLANE183 单元，并设置单元行为是平面应变，单元公式为混合的

位移/力公式。接触单元和目标单元使用接触向导自动生成。

2.4 材料参数



因为赫兹接触假设材料的应力不超过材料的屈服应力，即所有的变形均发生在弹性接触阶段，也就是不考虑塑性变形，因此材料的应力-应变关系为线弹性，球体的弹性模量为2.11E8Pa，泊松比为0.3，平板的弹性模量为2.2E8Pa，泊松比为0.31。

2.5 边界条件和载荷

该实例的边界条件为完全约束平板的底面，载荷施加在球体的顶端，其值为10000N，方向竖直向下。

2.6 GUI 操作

1．定义文件名

GUI：Utility Menu→File→Change Jobname，弹出一个对话框，在输入栏中输入“HERTZ CONTACT ANALYSIS”，单击“OK”按钮。

2．选择单元

（1）定义单元

GUI：Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete，弹出对话框，单击“Add”按钮，在弹出对话框的左边选择“Solid”，然后在右边选择“Quad 4 node 183”单元，单击“OK”按钮。

（2）设置单元关键字

在单元类型对话框中选择“PLANE182”选项。然后再选择“Options”选项，在弹出的对话框中设置“Element behabior”为“Plane strain”；设置“Element formulation”为“Mixde U/P”单击“OK”按钮回单元类型界面，然后单击“Close”按钮关闭对话框。

3．定义材料模型

GUI：Main Menu→Preprocessor→Material Props→Material Models，弹出“定义材料模型”面板，单击 Structural→Liner→Elastic→Isotropic，又弹出如图 2-2 所示的“线弹性材料模型参数”设置面板，输入 EX 为“2.11E8”、PRXY 为“0.3”，单击“OK”按钮；单击Material→New Model，弹出“定义材料 ID 号”设置面板，保持默认设置，单击“OK”按钮，然后单击 Structural→Liner→Elastic→Isotropic，又弹出如图 2-2 所示的“线弹性材料模型参数”设置面板，输入 EX 为“2.2E8”，PRXY 为“0.31”，输入完毕后单击“OK”按钮，然后单击 Material→Exit，退出定义材料模型面板。

4．建立模型

（1）建立平板模型

GUI：Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Rectangle→By Dimensions，弹出图 2-3 所示的“创建矩形”面板，在该面板中输入 X1 为“-0.2”、X2 为“0”、Y1 为

“-0.06”和 Y2 为“0”，单击“OK”按钮。

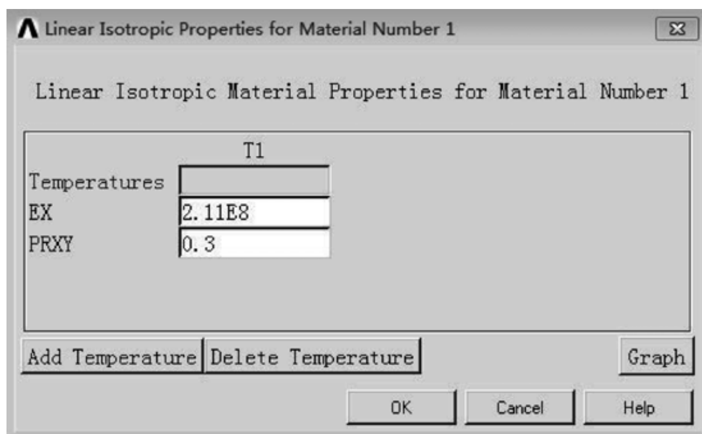


图 2-2 “线弹性材料模型参数”设置面板

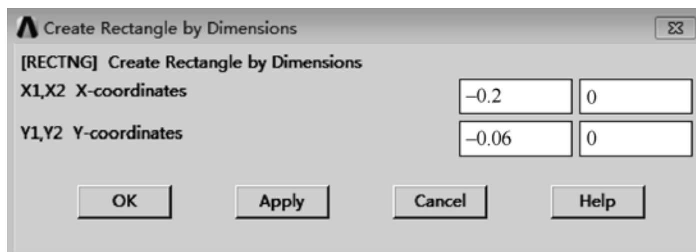


图 2-3 “创建矩形”面板

（2）建立球体

GUI：Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Circle→Partial Annulus，弹出如图 2-4 所示的“定义圆环参数”设置面板，输入 WP X 为“0”，WP Y 为“0.07”，Rad-1 为“0”，Theta-1 为“90”，Rad-2 为“0.07”，Theta-2 为“270”，单击“OK”按钮。

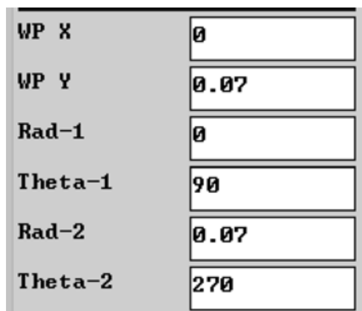


图 2-4 “定义圆环参数”设置面板

5．划分网格

（1）打开网格划分工具

GUI：Main Menu→Preprocessor→Meshing→MeshTool

（2）设置线的网格尺寸

单击“网格划分工具面板”上面的 Size Controls→Lines→Set，弹出“拾取”对话框，拾取线 L3，单击“Apply”按钮，弹出如图 2-5 所示的“在线处设置单元尺寸”面板，“No. of element divisiona”设为“80”，“Spacing ratio”设为“200”，单击“Apply”按钮；继续拾取线 L2，单击“Apply”按钮，“No.of element divisions”设为“45”，“Spacing ratio”设为“0.005”，单击“Apply”按钮；继续拾取线 L5，单击“Apply”按钮，“No.of element divisions”设为“100”，“Spacing ratio”设为“0.005”，单击“Apply”按钮；继续拾取线 L6，单击“Apply”按钮，“No.of element divisions”设为“80”，“Spacing ratio”设为“200”，单击“OK”按钮。

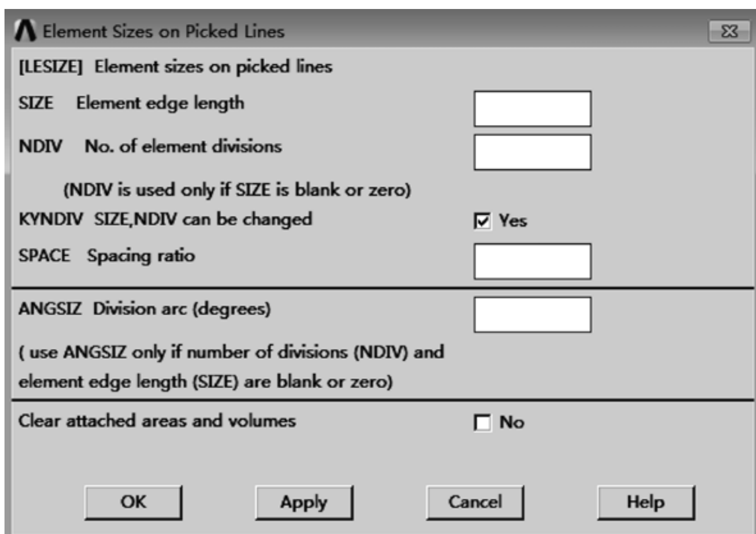


图 2-5 “在线处设置单元尺寸”面板

（3）设置总体网格尺寸

选择如图 2-6 所示的“网格划分工具”面板中“尺寸控制”子面板中的“Global”选项并单击“Set”按钮，弹出如图 2-7 所示的“总体网格尺寸”设置面板。

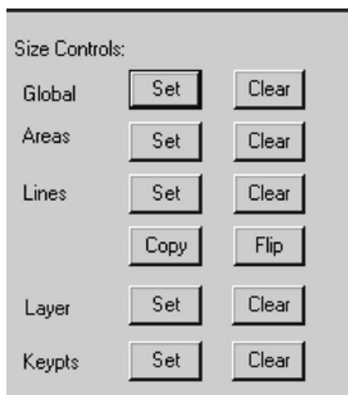


图 2-6 “网格划分工具”面板中“尺寸控制”子面板

该设置面板中存在两个控制选项，“Element edge length”和“No. of element divisions”，“Element edge length”设为“0.005”，单击“OK”按钮。

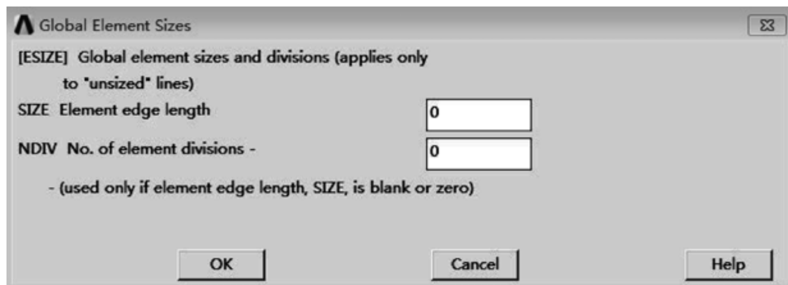


图 2-7 “总体网格尺寸”设置面板

（4）为平板分配单元属性

选择“网格划分”工具面板上“Element Attributes”子面板中的“Global”，并单击“Set”按钮，弹出图 2-8 所示的“网格属性”设置面板，该面板中主要包括 5 个选项：“Element type number”为网格划分准备单元；“Material number”为生成的单元赋予相应的材料模型号；“Real constant set number”为生成的单元赋予相应的实常数号；“Element coordinate sys”，为生成的单元赋予响应的坐标系；“Section number”选项主要为管道、梁和壳体单元赋予相应的截面信息。这些信息如果已经定义，则在网格属性面板中会相应的显示，如果没有定义则显示“None defined”，“Material number”设为“1”，单击“OK”按钮。

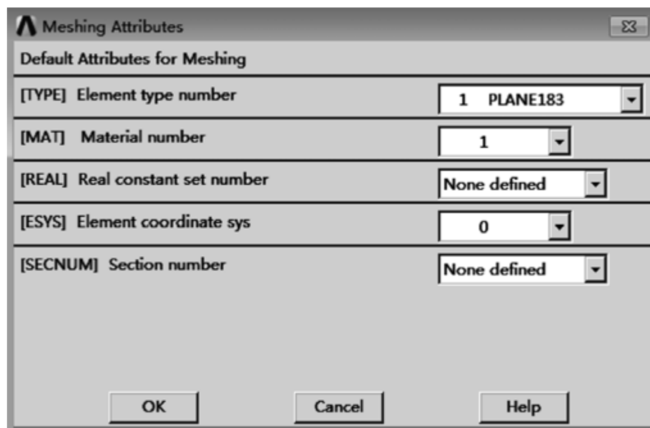


图 2-8 “网格属性”设置面板

（5）划分平板网格

单击“网格划分工具”面板上的“Mesh”按钮，弹出“拾取”对话框，拾取矩形板，单击“OK”按钮。

（6）为球体分配单元属性

选择“网格划分工具”面板上“Element Attributes”子面板中的“Global”，并单击“Set”按钮，弹出图 2-8 所示的“网格属性”设置面板，“Material number”设为“2”，单击“OK”按钮。

（7）划分球体网格

单击“网格划分工具”面板上的“Mesh”按钮，弹出“拾取”对话框，拾取半圆形，单击“OK”按钮，图 2-9 给出了接触分析的有限元模型。

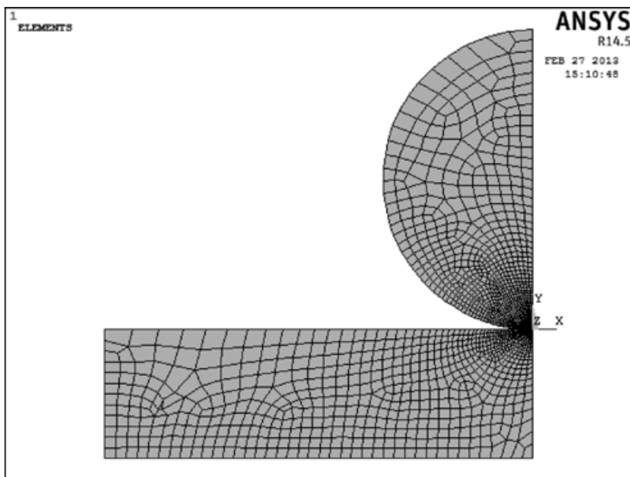


图 2-9　接触分析的有限元模型

6．定义接触对

（1）打开接触管理器

单击主菜单中的图标，弹出如图 2-10 所示的“接触管理器”面板。

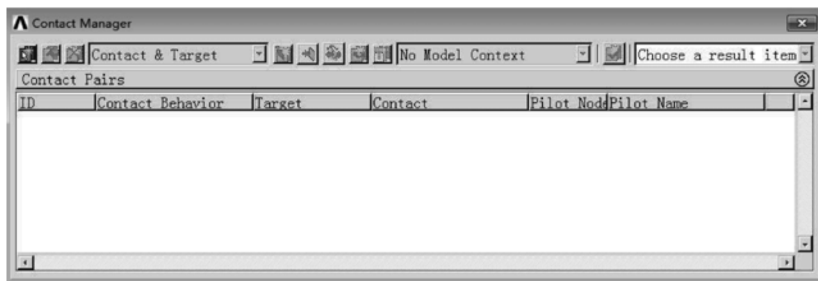


图 2-10　“接触管理器”面板

（2）创建圆形刚性轴与方形密封圈的刚-柔接触

单击“接触管理器”中的，弹出如图 2-11 所示的“目标面及目标单元类型”设置面板，在该面板中设置“Target Surface”为“Lines”，设置“Target Type”为”Flexible”，单击“Pick Target”按钮，弹出拾取对话框，拾取半圆形的圆弧 L5，单击“Apply”按钮，然后单击图 2-11 所示的“Next”按钮，弹出图 2-12 所示的“接触面及接触单元类型”设置面板，在该面板中设置“Contact Surface”为“Lines”，“Contact Element Type”为“Surface-to-Surface”，单击“Pick Contact”按钮，拾取线 L3，单击“Apply”按钮，单击图 2-12 中的“Next”按钮，弹出图 2-13 所示的“创建接触对”面板，“Coefficient of Friction”设为“0.1”，单击“Optional settings”按钮，弹出如图 2-14 所示的“接触对属性”设置面板，保持默认设置，单击“OK”按钮，返回如图 2-13 所示“创建接触对”面板，单击“Creat”按钮来创建接触对。



图 2-11 “目标面及目标单元类型”设置面板

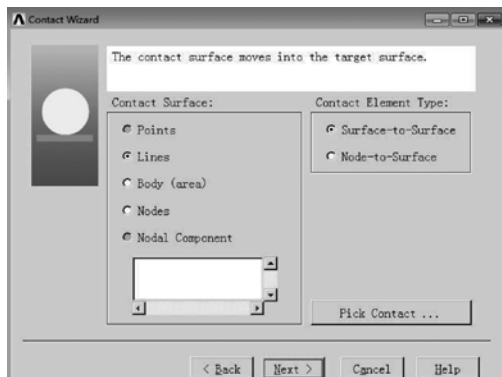


图 2-12 “接触面及接触单元类型”设置面板

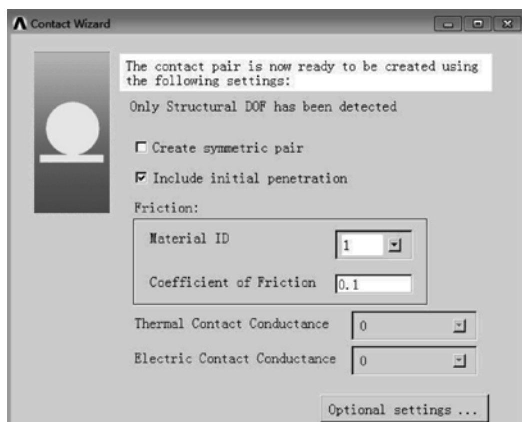


图 2-13 “创建接触对”面板

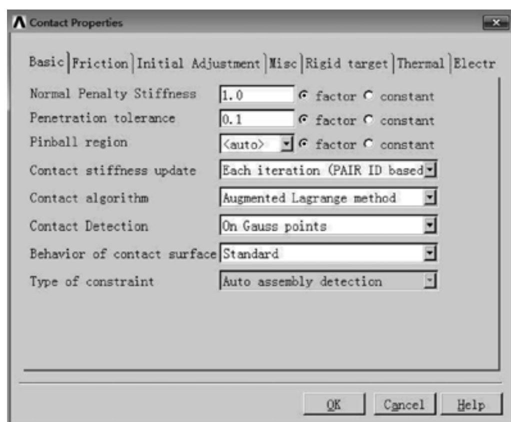


图 2-14 “接触对属性”设置面板

2.6.1 求解

1．设置分析类型

（1）激活静力学求解

GUI：Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis，弹出如图 2-15 所示的“分析类型”设置面板，选择“Static”选项，单击“OK”按钮。

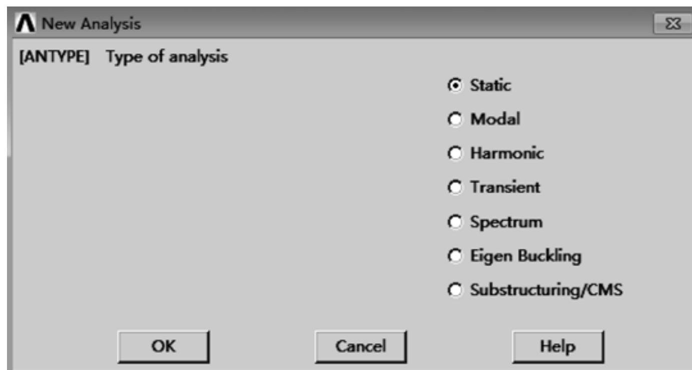


图 2-15 “分析类型”设置面板

（2）设置分析选项

GUI：Main Menu→Preprocessor→Loads→Analysis Type→Analysis Options，弹出如图 2-16 所示的“静态分析选项”设置面板，勾选“Large deform effects”复选框，激活大变形分析，其他设置保存默认设置，单击“OK”按钮。

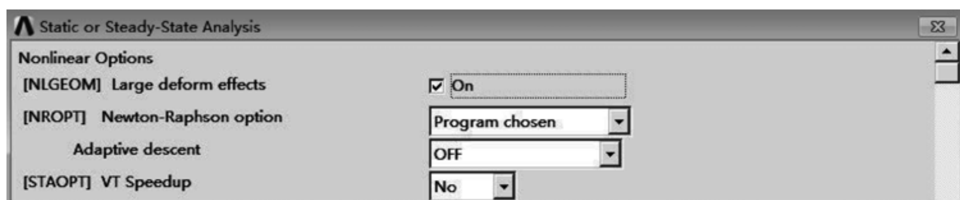


图 2-16 “静态分析选项”设置面板

2．定义边界条件

（1）完全约束平板的底边

GUI：Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Lines，弹出“拾取”对话框，拾取线 L1，单击“OK”按钮，弹出如图 2-17 所示的“线位移约束”设置面板，该面板中包括 3 个控制选择：“DOFs to be constrained”，本实例中选择“ALL DOF”，即约束所有方向的位移；“Apply as”，ANSYS 支持 3 类施加方式，即“Constant value”“Existing table”“New table”，本实例中选择“Constant Value”；“Displacement value”中输入“0”，单击“OK”按钮。

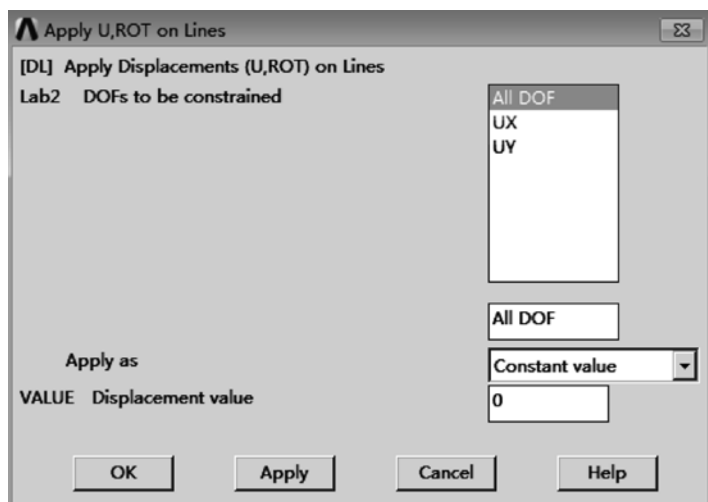


图 2-17 “线位移约束”设置面板

（2）施加对称约束

GUI：Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→Symmetry B.C.→On Lines，弹出“拾取”对话框，拾取线 L2，L6 和 L7，单击“OK”按钮。

3．定义载荷

（1）获取施加载荷节点的节点号

用户在命令窗口中输入以下命令流可以获得施加载荷的节点号。

N1=NODE(0,0.14,0)

（2）施加载荷

GUI：Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Force/Moment→On Nodes，弹出“拾取”对话框，输入“N1”，单击“OK”按钮，弹出如图2-18所示的“在节点处施加力/力矩”的设置面板，“Direation of force/mom”为选择“FY”，“Force/moment Value”设为“-10000”，单击“OK”按钮。

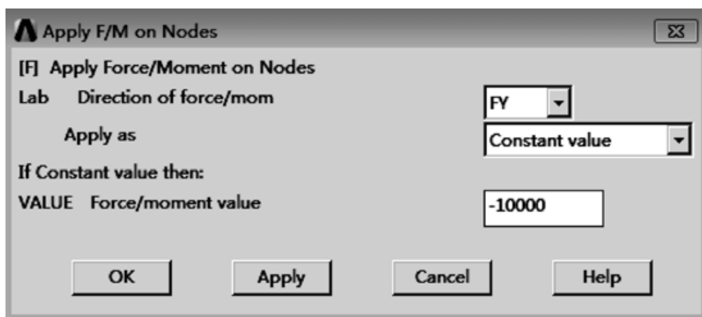


图2-18 “在节点处施加力/力矩”的设置面板

4．定义载荷步

（1）控制输出计算结果

GUI：Main Menu→Solution→Load Step Opts→Output Ctrls→DB/Results File，弹出图2-19所示的“计算结果输出”控制面板，该面板包括两个控制选项：“Item to be controlled”，如果硬盘空间足够大，建议“Item to be controllod”设为“All items”；“File write frequency”，包括“Reset”，“None”“At time points”“Last substep”“Every substep”，“Every Nth substp”，选择该选项后需输入N值，本实例选择“Every substep”，单击“OK”按钮。

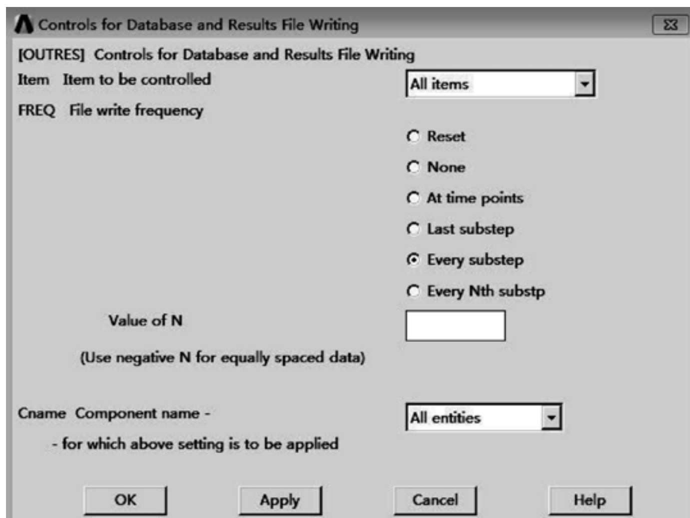


图2-19 “计算结果输出”控制面板

（2）设置计算时间和子步

GUI：Main Menu→Solution→Load Step Opts→Time/Frequence→Time and Substeps，弹出如图 2-20 所示的“时间和子步选项”设置面板，“Time at end of load step”设为“1”，“Number of substeps”设为“10”，“Stepped or ramped b.c.”选择“Ramped”，“Automatic time stepping”选择“ON”，“Maximum no. of substeps”，“Minimum no. of substeps”设为“10”。

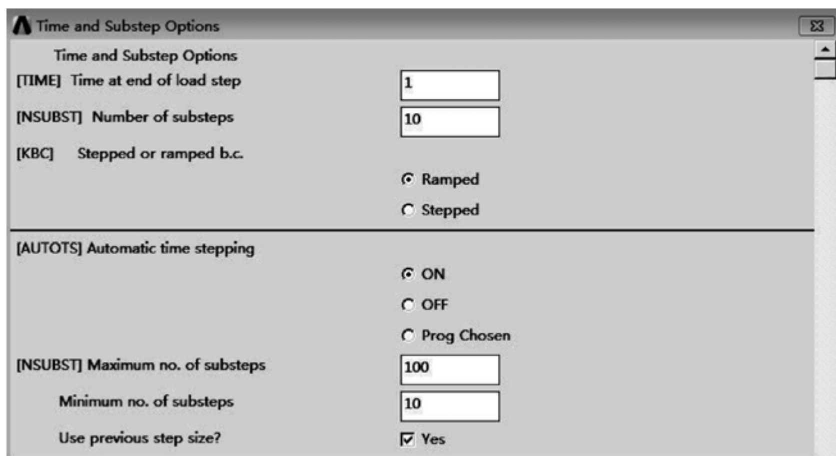


图 2-20 “时间和子步选项”设置面板

5．求解

GUI：Main Menu→Solution→Solve→Current LS，在弹出的“求解状态”对话框中单击“OK”按钮，开始求解。

2.6.2 后处理

图 2-21～图 2-24 给出了赫兹接触的等效位移、等效应力、接触状态和接触压力云图，具体的查看方法，用户可以参考本章的视频教程。

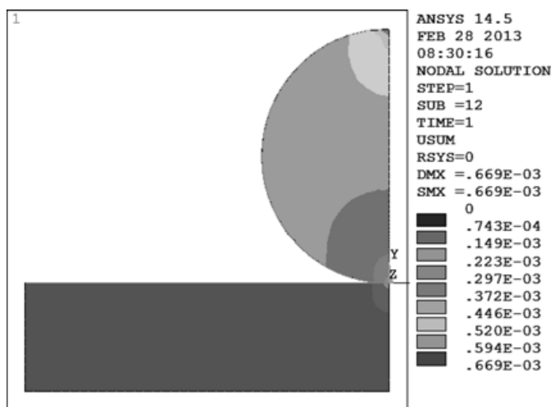


图 2-21 赫兹接触等效位移云图

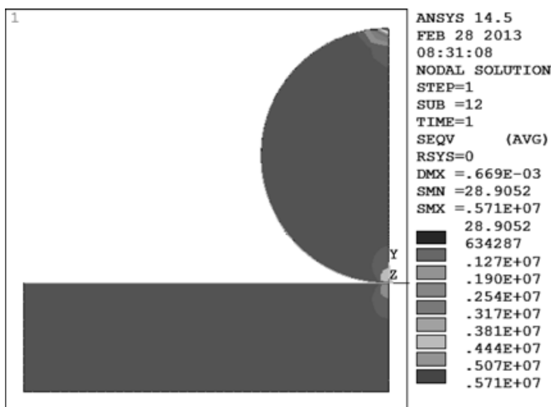


图 2-22 赫兹接触等效应力云图

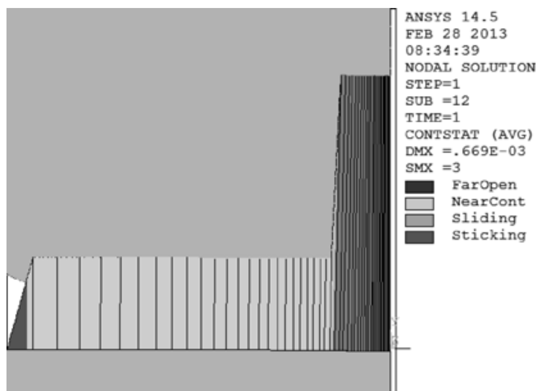


图 2-23　赫兹接触的接触状态云图

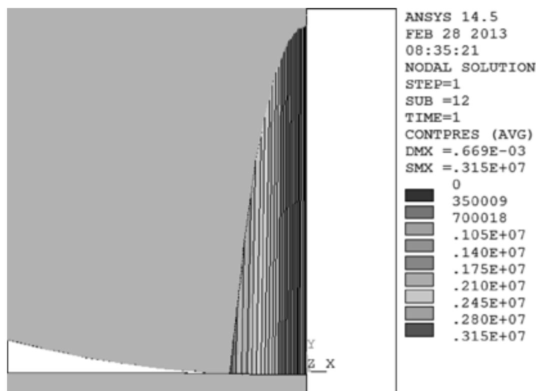


图 2-24　赫兹接触的接触压力云图

2.7　命令流

```
/FILNAME, Hertz contact analysis,0
!进入前处理器
/PREP7
ET,1,PLANE183    !定义单元
!定义单元关键字
KEYOPT,1,1,0
KEYOPT,1,3,2
KEYOPT,1,6,1
!定义材料参数
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,1,,2.11e8
MPDATA,PRXY,1,,0.3
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,2,,2.2e8
MPDATA,PRXY,2,,0.31
!建立模型
RECTNG,-0.2,0,-0.06,0,
CYL4,0,0.07,0,90,0.07,270
!划分网格
LESIZE,3, , ,80,200, , , ,1
LESIZE,2, , ,45,0.005, , , ,1
LESIZE,5, , ,100,0.005, , , ,1
LESIZE,6, , ,80,200, , , ,1
ESIZE,0.005    !定义总体网格尺寸
TYPE,1      !设置划分网格单元类型
MAT,2       !设置划分网格材料号
AMESH,1
```



```
MAT,1
AMESH,2
!创建接触对
!创建接触的方法，用户可以参见本章视频
!进入求解
/SOL
ANTYPE,0
NLGEOM,1    !激活大变形
!定义边界条件
DL,1, ,ALL,
DL,2, ,SYMM
DL,6, ,SYMM
DL,7, ,SYMM
!施加载荷
N1=NODE(0,0.14,0)
F,N1,FY,-10000
!设置载荷步
OUTRES,ALL,ALL,    !输出所有计算结果
TIME,1
AUTOTS,1
NSUBST,10,100 ,10 ,1
KBC,0
SOLVE
```

第 3 例　搭接结构的界面开裂失效模拟

3.1　实例覆盖的知识点

读者通过学习该实例可以掌握如下 ANSYS 的知识点。

1）静力学分析的基本步骤。

2）设置内聚力材料模型的方法。

3）使用接触向导创建接触对的步骤。

4）激活大变形分析的方法。

5）非线性求解的基本设置方法。

6）激活预测器的方法。

3.2　模型

图 3-1 给出了搭接结构的力学分析模型，在实际工程中使用粘结胶将两块板粘结起来，图 3-1 给出了模型的几何尺寸，单位为 m。

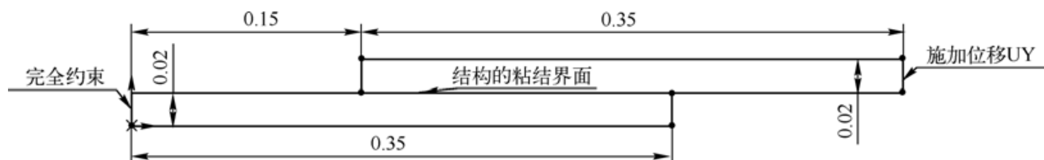


图 3-1　搭接结构的力学分析模型

3.3　单元

本实例选用平面 8 节点单元 PLANE182 单元模拟两块板，两块板的胶结面使用接触对进行定义，接触单元通过接触向导自动定义；设置 PLANE182 单元为平面应变行为。

3.4　材料参数

本实例假设两块板的材料模型为线弹性，弹性模量为 2.11E11Pa，泊松比为 0.3；胶结面使用双线性内聚力模型，模型参数为最大法向接触拉应力 2.5MP，法向开临开裂界能量释放率为 0.2E3N/m，人工阻尼系数为 5E-5。

3.5 边界条件和载荷

如图 3-1 所示，边界条件为完全约束模型的左侧并在模型的右侧顶部施加一个竖直向上的位移大小为 0.015m。



3.6 GUI 操作

1．定义文件名

GUI：Utility Menu→File→Change Jobname，弹出一个对话框，在输入栏中输入“Interface cracking failure”，单击“OK”按钮。

2．选择单元

（1）定义单元

GUI：Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete，弹出对话框，单击“Add”按钮，在弹出对话框的左边选择“Solid”选项，然后在右边选择“Quad 4 node 182”单元，单击“OK”按钮。

（2）设置单元关键字

在“单元类型”对话框中选择“PLANE182”，然后选择“Options”选项，在弹出的对话框中设置“Element behavior”为“Plane strain”，单击“OK”按钮；回单元类型界面，然后单击“Close”按钮关闭对话框。

3．定义材料模型

（1）定义平板的材料模型

GUI：Main Menu→Preprocessor→Material Props→Material Models，弹出“定义材料模型”面板，单击 Structural→Liner→Elastic→Isotropic，又弹出如图 3-2 所示的“线弹性材料模型参数”设置面板，设置 EX 为“2.11E11”、PRXY 为“0.3”，单击“OK”按钮，然后单击 Material→Exit，退出“定义材料模型”面板。

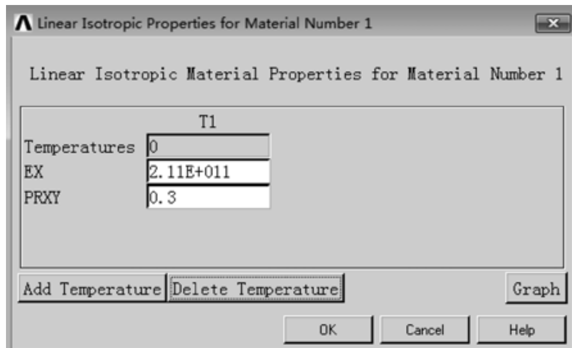


图 3-2 “线弹性材料模型参数”设置面板

（2）定义平板之间界面的内聚力模型

ANSYS 对于该材料模型，只支持命令流输入，其命令流如下。

```
TB,CZM,2,1,1,CBDE
TBDATA,1,2.5e6,0.2e3,,,5E-5
```

4．建立模型

GUI：Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Rectangle→By Dimensions，弹出如图 3-3 所示的“创建矩形”面板，在该面板中输入 X1 为“0”、X2 为“0.35”、Y1 为“-0”和 Y2 为“0.02”，单击“Apply”按钮；继续输入 X1 为“0.15”，X2 为“0.5”，Y1 为“0.02”，Y2 为“0.04”，单击“OK”按钮。

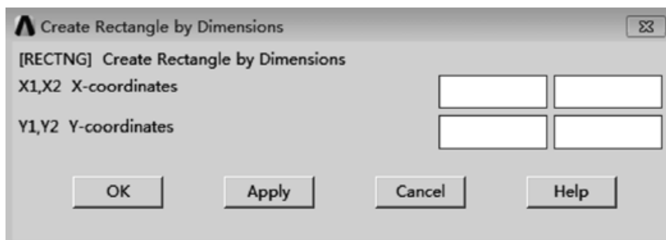


图 3-3 “创建矩形”面板

5．划分网格

（1）打开网格划分工具

GUI：Main Menu→Preprocessor→Meshing→MeshTool。

（2）设置总体网格尺寸

选择如图 3-4 所示的“网格划分工具”面板中“尺寸控制”子面板中的“Global”选项并单击“Set”按钮，弹出如图 3-5 所示的“总体网格尺寸”设置面板。



图 3-4 “网格划分工具”面板中“尺寸控制”子面板

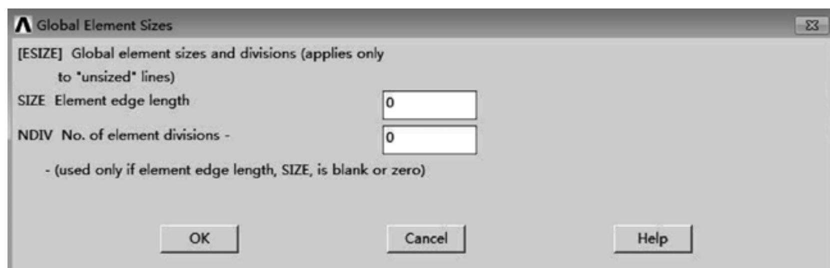


图 3-5 “总体网格尺寸”设置面板

该设置面板中存在两个控制选项，“Element edge length”和“No. of element divisions”，在单元尺寸中输入“0.0038”，单击“OK”按钮。

（3）划分网格

选择“网格划分工具”面板上的“Mesh”，弹出“拾取”对话框，单击“Pick All”按钮。

6．定义接触对

（1）打开接触管理器

单击主菜单中的图标，弹出如图 3-6 所示的“接触管理器”面板。

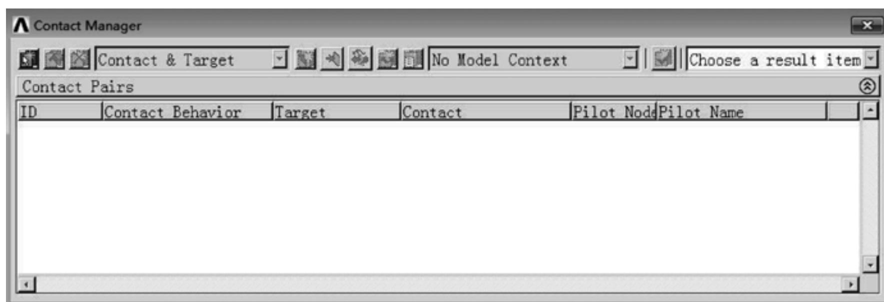


图 3-6 “接触管理器”面板

（2）创建平板之间的接触对

单击接触管理器中的，弹出如图 3-7 所示的“目标面及目标单元类型”设置面板，在该面板中设置“Target Surface”为“Lines”，设置“Target Type”为“Flexible”，单击“Pick Target”按钮，弹出“拾取”对话框，拾取线 L5，单击“Apply”按钮，然后单击图 3-7 所示的“Next”按钮，弹出图 3-8 所示的“接触面及接触单元类型”设置面板，在该面板中设置“Contact Surface”为“Lines”，“Con tact Element Type”为“Surface-to- Surface”，单击“Pick Contact”按钮，拾取线 L3，单击“Apply”按钮，单击图 3-8 中的“Next”按钮，弹出图 3-9 所示的“创建接触对”面板，“Material ID”选择“2”，单击“Optional settings”按钮，弹出如图 3-10 所示的“接触对属性”设置面板，“Behavior of contact surface”选择“Bonded (initial contact)”，单击“OK”按钮，返回如图 3-9 所示“创建接触对”面板，单击“Creat”按钮来创建接触对。

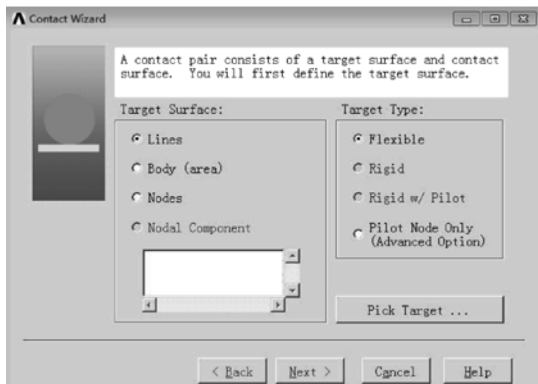


图 3-7 “目标面及目标单元类型”设置面板

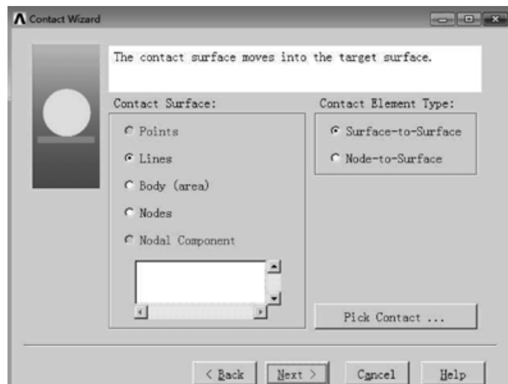


图 3-8 “接触面及接触单元类型”设置面板



图 3-9 “创建接触对”面板

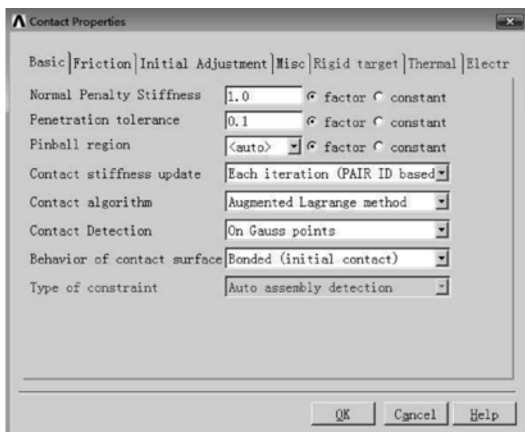


图 3-10 “接触对属性”设置面板

3.6.1 求解

1．设置分析类型

（1）激活静力学求解

GUI：Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis，弹出如图 3-11 所示的“分析类型”设置面板，选择“Static”选项，单击“OK”按钮。

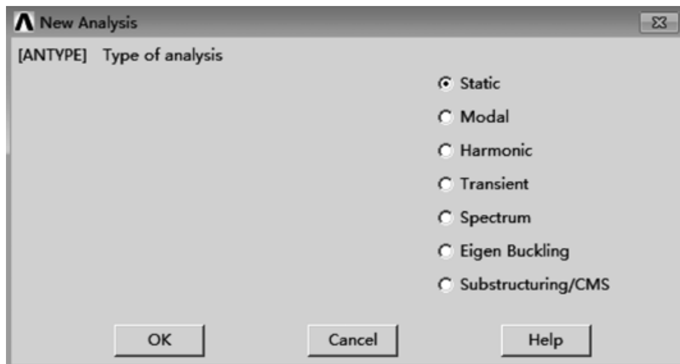


图 3-11 “分析类型”设置面板

（2）设置分析选项

GUI：Main Menu→Preprocessor→Loads→Analysis Type→Analysis Options，弹出如图 3-12 所示的“静态分析选项”设置面板，勾选“Large deform effects”复选框，激活大变形分析，其他设置保存默认设置，单击“OK”按钮。

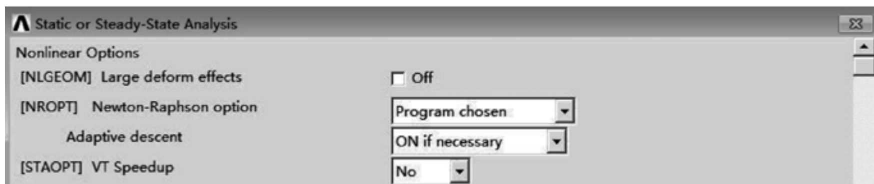


图 3-12 “静态分析选项”设置面板

2．定义边界条件

（1）完全约束平板的底边

GUI：Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Lines，弹出“拾取”对话框，拾取线 L4，单击“OK”按钮，弹出如图 3-13 所示的“线位移约束”设置面板，选择“ALL DOF”，即约束所有方向的位移；“Apply as 在 ANSYS 中支持 3 类施加方式，分别是：“Constant value”“Existing table”“New table”。本实例中选择“Constant value”，“Displacement value”设为“0”，单击“OK”按钮。

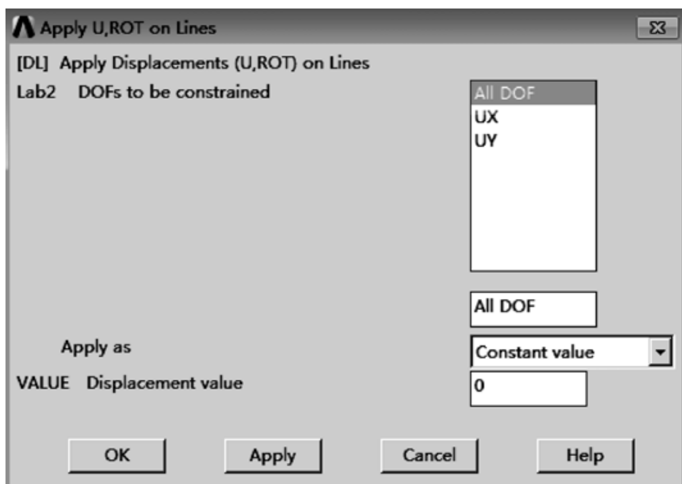


图 3-13 “线位移约束”设置面板

（2）施加竖直位移

GUI：Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Lines，弹出“拾取”对话框，拾取线 L5，单击“OK”按钮，弹出如图 3-13 所示的“线位移约束”设置面板，选择“UY”，即约束 Y 方向的位移；选择“Constant Value”，在“Displacement value”中输入“-0.015”，单击“OK”按钮。

3．定义载荷步

（1）控制输出计算结果

GUI：Main Menu→Solution→Load Step Opts→Output Ctrls→DB/Results File，弹出图 3-14 所示的“计算结果输出”控制面板，选择“Every substep”，单击“OK”按钮。

（2）设置计算时间和子步

GUI：Main Menu→Solution→Load Step Opts→Time/Frequence→Time and Substeps，弹出如图 3-15 所示的“时间和子步选项”设置面板，“Time at end of load step”设为“1”，“Number of substeps”设为“100”，“Automatic time stepping”选择“ON”，其他设置保持默认，单击“OK”按钮。

（3）设置非线性计算预测器

GUI：Main Menu→Solution→Load Step Opts→Nonlinear→Predictor，弹出如图 3-16 所示的“非线性求解预测器”设置面板，“DOF Solution predictor”选择“On for all sbstp”，单击“OK”按钮。



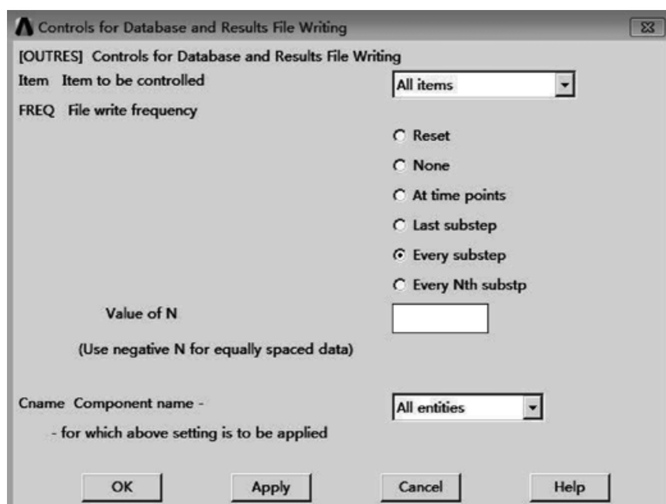


图 3-14 “计算结果输出”控制面板

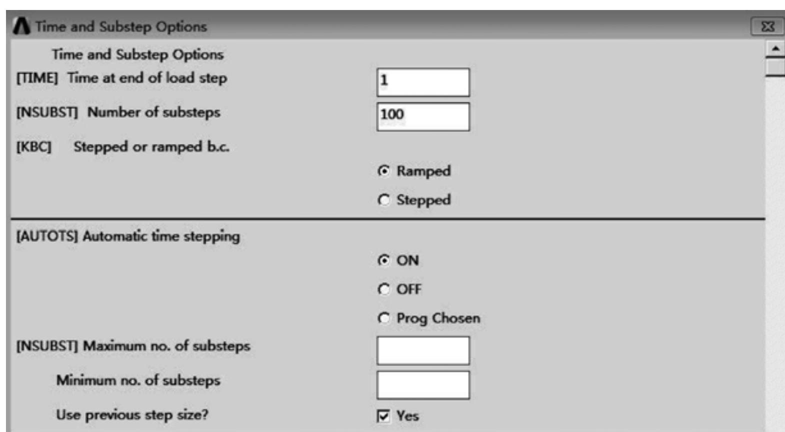


图 3-15 “时间和子步选项”设置面板

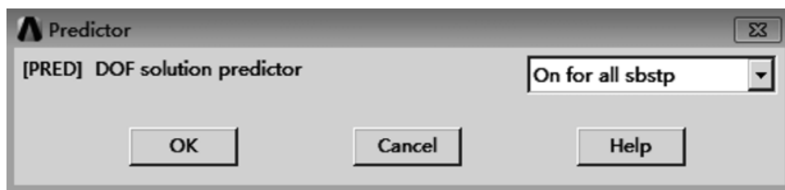


图 3-16 “非线性求解预测”设置面板

4．求解

GUI：Main Menu→Solution→Solve→Current LS，在弹出的“求解状态”对话框中单击“OK”按钮，开始求解。

3.6.2 后处理

图 3-17～图 3-22 给出了搭接结构界面开裂过程中的等效应力云图，由图可知初始开裂时，结构的最大等效应力达到的最大值为 345MPa，开裂以后，结构的最大等效应力开始下

降，在第 38 个子步时，最大等效应力减小为 145MPa。

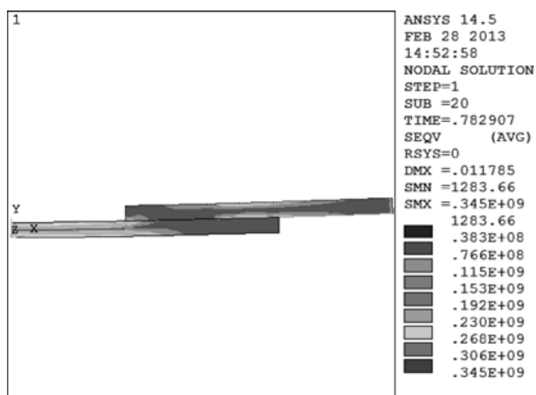


图 3-17　第 20 个子步时的等效应力云图

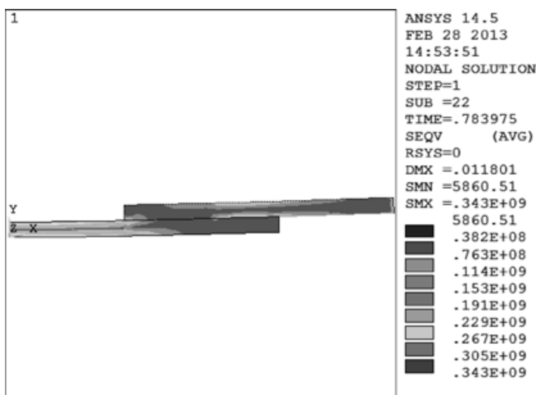


图 3-18　第 22 个子步时的等效应力云图

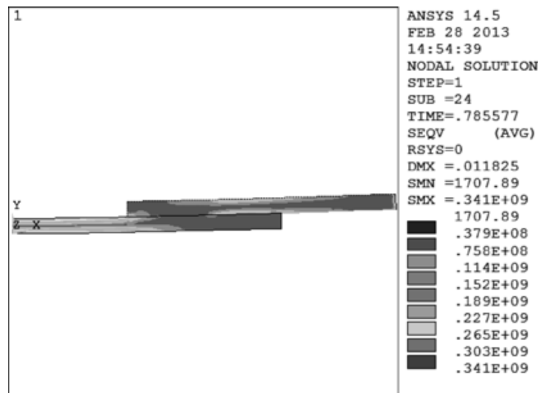


图 3-19　第 24 个子步时的等效应力云图

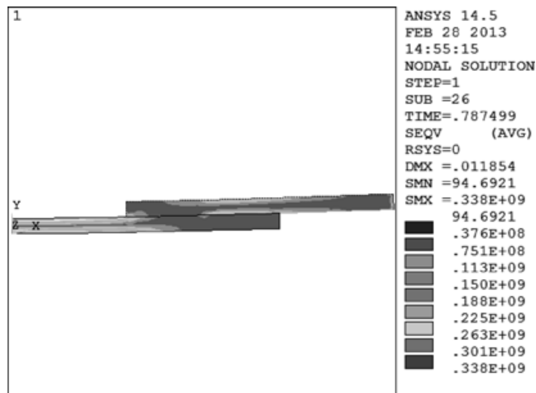


图 3-20　第 26 个子步时的等效应力云图

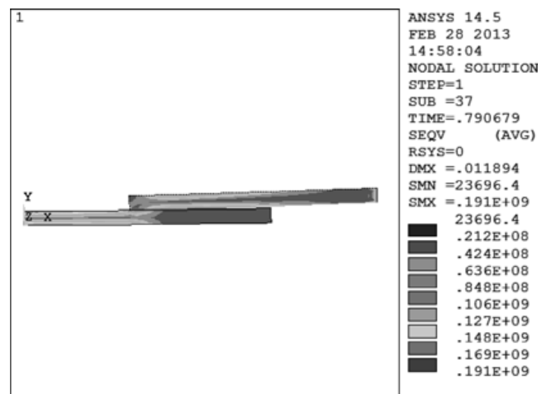


图 3-21　第 37 个子步时的等效应力云图

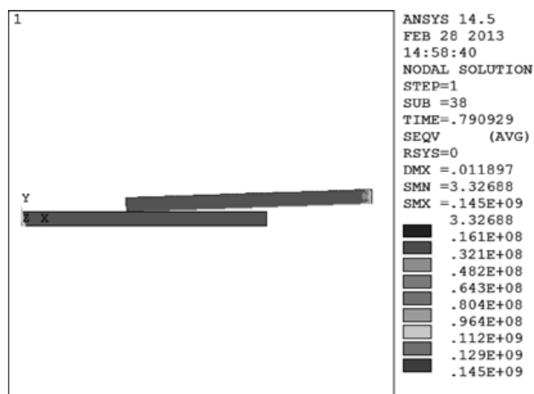


图 3-22　第 38 个子步时的等效应力云图

图 3-23 给出了搭接结构右侧界面端部接触单元 1302 处接触压力随时间的变化，由图可知当计算时间为 0.78333s 时，接触压力降为 0，则表明该结构已经发生开裂；图 3-24 给出了施加竖直位移处 753 节点的 Y 方向反力随时间变化的关系，由图可知结构开裂过程中的最

大反力为 199450N。

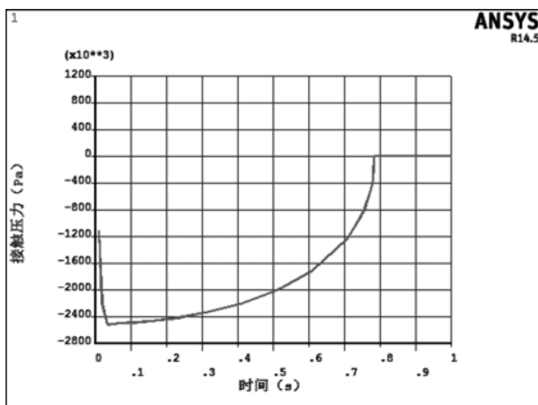


图 3-23　1302 单元处接触压力随时间变化关系

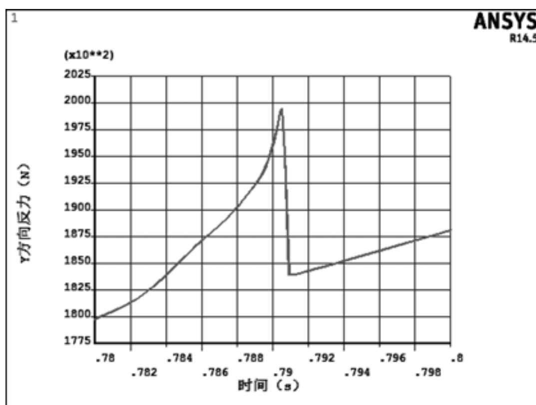


图 3-24　753 节点处 Y 方向反力随时间变化关系

3.7　命令流

```
/FILNAME, Interface cracking failure,0
!进入前处理
/PREP7
ET,1,182 !定义单元
!设置单元关键字
KEYOPT,1,1,0
KEYOPT,1,3,2
KEYOPT,1,6,0
!定义材料参数
MP,EX,1,2.11e11
MP,PRXY,1,0.3
!设置胶结面上的内聚力模型
TB,CZM,2,1,1,CBDE
TBDATA,1,2.5e6,0.2e3,,,5E-5
!建立模型
RECTNG,0,0.35,0,0.02,
RECTNG,0.15,0.5,0.02,0.04,
ESIZE,0.0038
AMESH,ALL
!定义接触对
!接触对的定义方法，用户参见本章的视频教程
!进入前处理
/SOL
ANTYPE,0     !设置分析类型为静力学分析
NLGEOM,1     !激活大变形
!定义边界条件
DL,4, ,ALL,
```



```
DL,6, ,UY,0.015
OUTRES,ALL,ALL, !设置输出所有计算结果
TIME,1
AUTOTS,1
NSUBST,100,0,0,1
KBC,0
TSRES,ERASE
PRED,ON,,ON      !打开非线性控制中的预测器
SOLVE
```

第 4 例　薄板多道焊接残余应力有限元分析

4.1　实例覆盖的知识点

读者通过学习该实例可以掌握如下 ANSYS 的知识点。

1）瞬态动力学分析的基本步骤。

2）直接热-结构耦合分析的步骤。

3）定义随温度变化的材料参数方法。

4）激活双线性等向强化模型的方法。

5）函数加载的基本方法。

6）施加高斯热源的方法。

7）使用表面效应单元施加热流密度的方法。

8）使用多载荷步文件求解的步骤。

4.2　模型

图 4-1 给出了焊接模型的俯视图，模型的几何尺寸如图 4-1 所示，单位为 mm，该模型由两个焊道和 3 个焊件组成，其厚度为 5mm。

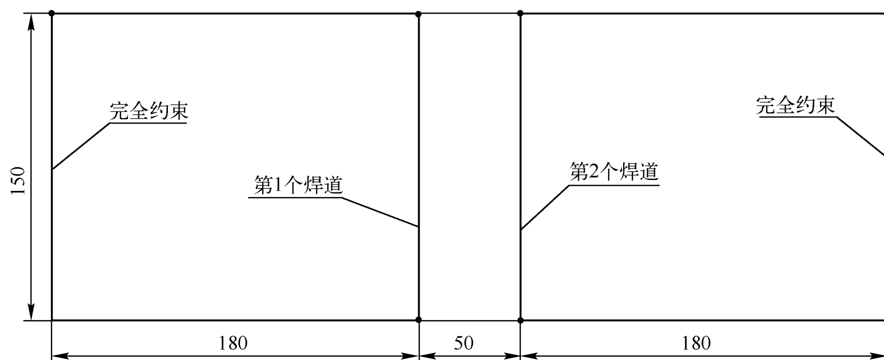


图 4-1　焊接模型的俯视图

4.3　单元

本实例采用直接法计算薄板多道焊接过程中的温度和应力问题，使用 SOLID226 进行

热-结构计算，使用表面效应单元 SURF152 单元施加热流密度。

4.4 材料参数

热源模型采用高斯热源，其焊接参数如下：电弧电压 U=22V；焊接电流 I=150A；焊接速度 $v=0.01\text{m/s}$；焊接热效率 $\eta=0.7$；电弧有效加热半径 R=8E-3m。焊接材料为低碳钢其材料性能如表 4-1 所示，各参数的单位均为国际单位。

表 4-1 焊件的材料性能参数

温度 *T*	20	200	500	750	1000	1500	1700	2500
导热系数	50	47	40	27	30	35	45	50
密度	7820	7700	7610	7550	7490	7350	7300	7090
比热容	460	480	530	675	670	660	780	820
泊松比	0.28	0.29	0.31	0.35	0.4	0.49	0.48	0.5
膨胀系数	1.1E-5	1.22E-5	1.39E-5	1.48E-5	1.34E-5	1.33E-5	1.32E-5	1.31E-5
弹性模量	2.05E11	1.87E11	1.5E11	0.7E11	0.2E11	0.19E2	0.18E2	0.12E2
屈服应力	225E6	185E6	85E6	45E6	15E6	1E-5		

4.5 边界条件和载荷

焊件的初始温度为 20℃，焊件的上面 3 个面和周围的 8 个面为对流换热，其对流系数为 30W/m^2/℃，焊件的底面也为对流换热，其对流换热系数为 300W/m^2/℃，高斯热源先从焊接模型的第一个焊道移动，然后在第二个焊道移动。完全约束模型的左右两端的侧面，约束模型底面上的 Y 方向位移，约束模型下侧面上的 Z 方向位移。

4.6 GUI 操作

4.6.1 前处理

1．定义文件名

GUI：Utility Menu→File→Change Jobname，弹出一个对话框，在输入栏中输入“Welding residual stress”，单击“OK”按钮。

2．选择单元

（1）定义单元

GUI：Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete，单击“Add”按钮，弹出如图 4-2 所示的“单元类型选择”对话框，在弹出对话框的左边选择“Coupled Field”，然后在右边选择“Brick 20node 226”单元，单击“Apply”按钮，继续在对话框的左边选择“Surface Effect”，然后在右边选择“3D thermal 152”单元，单击“OK”按钮。

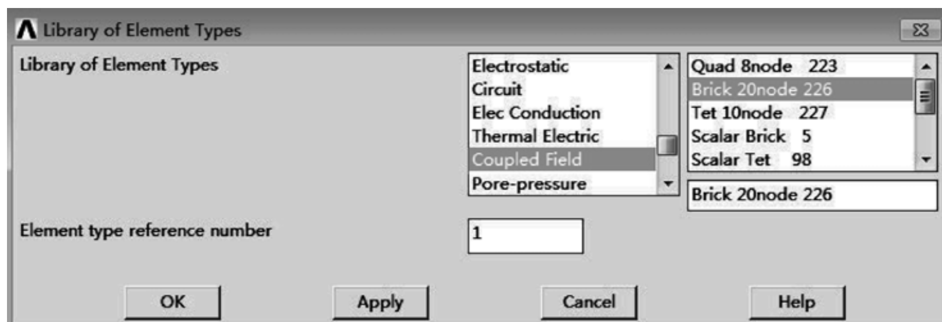


图 4-2 “单元类型选择”对话框

（2）设置单元关键字

在“单元类型”对话框中选择“SOLID226”，然后选择“Options”选项，弹出如图 4-3 所示的“SOLID226 单元关键字”设置面板，“Analysis Type”设为“Structural-thermal”，单击“OK”按钮；返回单元类型界面，继续在“单元类型”对话框中选择“SURF152”，然后选择“Options”选项，弹出如图 4-4 所示的“SURF152 单元关键字”设置面板，“Heat flux and convect loads”设为“Heat flux only”，然后单击“Close”按钮关闭对话框。

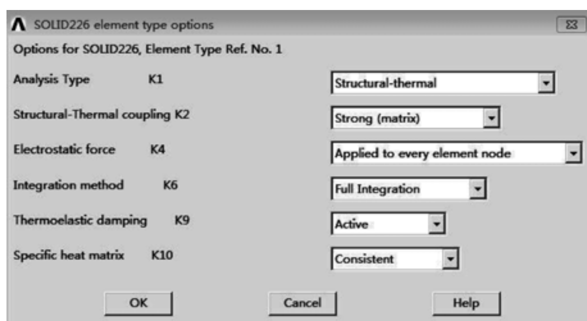


图 4-3 “SOLID226 单元关键字”设置面板

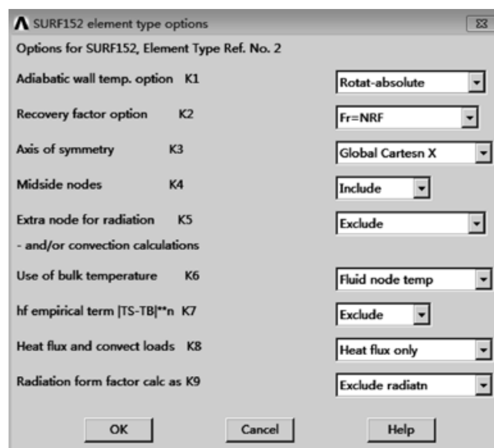


图 4-4 “SURF152 单元关键字”设置面板

3．定义参数

GUI：Utility Menu→Parameters→Scalar Parameters，在弹出对话框中的“Selection”中定义 U=22，单击“Accept”按钮完成对焊接电压的参数定义，按照此方法继续定义焊接电流 I=150，焊接速度 V=0.01，焊接热效率 YITA=0.7，电弧有效加热半径 R=0.008，电弧热功率 Q=U*I*YITA，加热斑点中心最大热流密度 Qm=3/3.1415/R**2*Q，定义完毕后单击“Close”按钮。

4．定义材料模型

GUI：Main Menu→Preprocessor→Material Props→Material Models，弹出一个对话框，单击 Structural→Liner→Elastic→Isotropic，弹出如图 4-5 所示的“线弹性各向同性材料属性参数”设置面板，连续单击“Add Temperature”按钮一直增加到 T8，然后根据材料表每一列

分别输入 T1=20，EX=2.05E11，PRXY=0.28；T2=200，EX=1.87E11，PRXY=0.29；T3=500，EX=1.5E11，PRXY=0.31；T4=750，EX=7E10，PRXY=0.35；T5=1000，EX=2E10，PRXY=0.4；T6=1500，EX=19，PRXY=0.49；T7=1700，EX=18，PRXY=0.5；T8=2500，EX=12，PRXY=0.5，单击“OK”按钮。

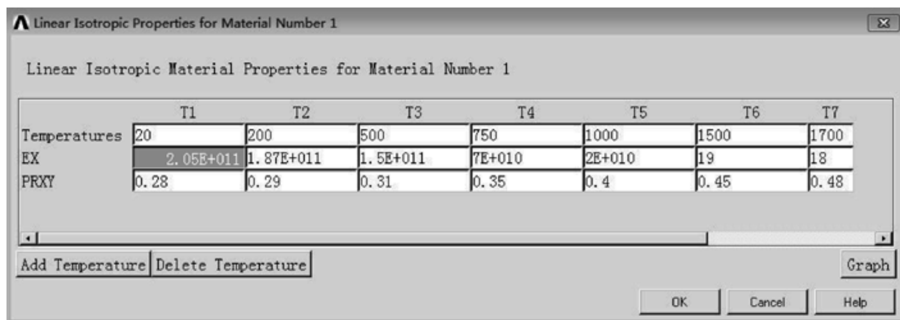


图 4-5 “线弹性各向同性材料属性参数”设置面板

设置材料的应力应变关系为双线性等向强化，单击 Structural→Nonlinear→Inelastic→Rate Independent→Mises Plasticity→Bilinear，弹出如图 4-6 所示的“双线性等向强化模型”设置面板，连续单击“Add Temperature”一直增加到 T6，然后根据材料表每一列分别输入 T1=20，Yield Stss=2.2E8，Tang Mod=0；T2=250，Yield Stss=1.85E8，Tang Mod=0；T3=500，Yield Stss=8.5E7，Tang Mod=0；T4=750，Yield Stss=4.5E7，Tang Mod=0；T5=1000，Yield Stss=1.5E7，Tang Mod=0；T6=1500，Yield Stss=1E-5，Tang Mod=0，单击“OK”按钮。

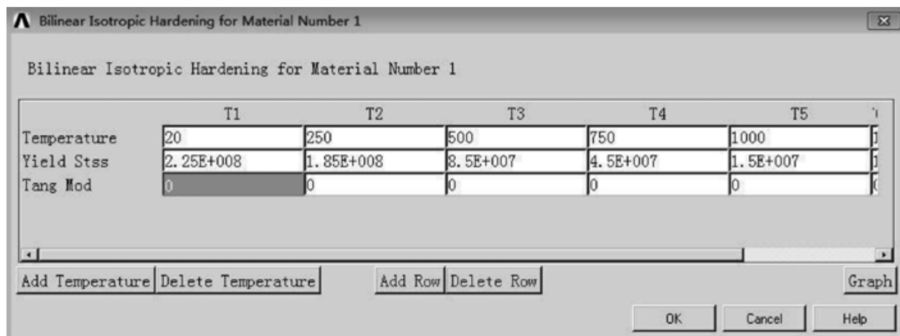


图 4-6 “双线性等向强化模型”设置面板

设置材料的密度，单击 Structural→Density，弹出如图 4-7 所示的“材料密度”设置面板，连续单击“Add Temperature”按钮一直增加到 T8，然后根据材料表每一列分别输入 T1=20，DENS=7820；T2=200，DENS=7700；T3=500，DENS=7610；T4=750，DENS=7550；T5=1000，DENS=7490；T6=1500，DENS=7350；T7=1700，DENS=7300；T8=2500，DENS=7090，单击 OK。

设置材料的比热，单击 Thermal→Specific Heat，弹出如图 4-8 所示的“材料比热”设置面板，连续单击“Add Temperature”按钮一直增加到 T8，然后根据材料表每一列分别输入 T1=20，C=460；T2=200，C=480；T3=500，C=530；T4=750，C=675；T5=1000，C=670；

T6=1500，C=660；T7=1700，C=780；T8=2500，C=820，单击“OK”按钮。

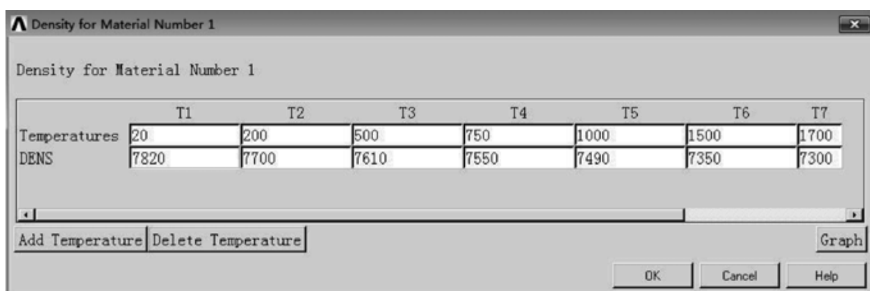


图 4-7 “材料密度”设置面板

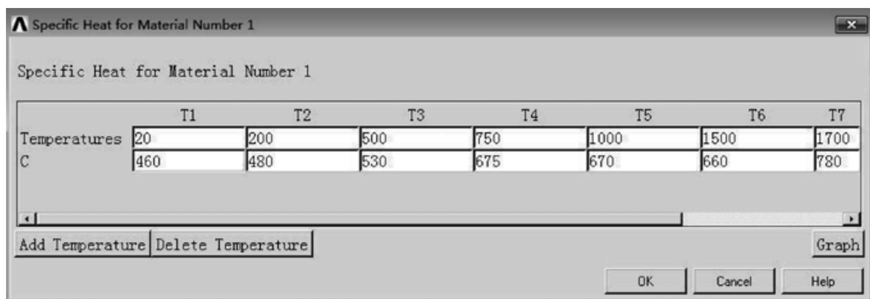


图 4-8 “材料比热”设置面板

设置热膨胀系数，单击 Structural→Thermal Expansion→Secent Coefficiemt→Isotropic，弹出如图 4-9 所示的“材料的热膨胀系数”设置面板，连续单击“Add Temperature”按钮一直增加到 T8，然后根据材料表每一列分别输入 T1=20，ALPX=1.1E-5；T2=200，ALPX=1.22E-5； T3=500， ALPX=1.39E-5； T4=750， ALPX=1.48E-5； T5=1000， ALPX=1.34E-5； T6=1500， ALPX=1.33E-5； T7=1700， ALPX=1.32E-5； T8=1700， ALPX=1.31E-5,， 单击“OK”按钮。

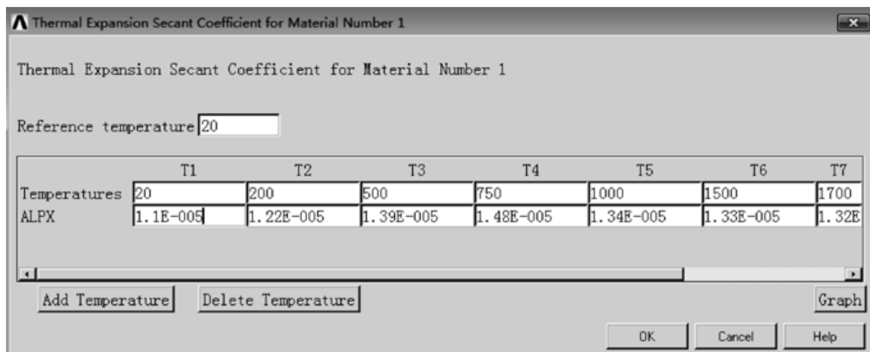


图 4-9 “材料的热膨胀系数”设置面板

设置热传导系数，单击 Thermal→Conductivity，弹出如图 4-10 所示的“材料的导热系数”设置面板，连续单击“Add Temperature”按钮一直增加到 T8，然后根据材料表每一列分别输入 T1=20，KXX=50；T2=200，KXX=47；T3=500，KXX=40；T4=750，KXX=27；T5=1000，

KXX=30；T6=1500，KXX=35；T7=1700，KXX=40；T8=2500，KXX=55，单击“OK”按钮。

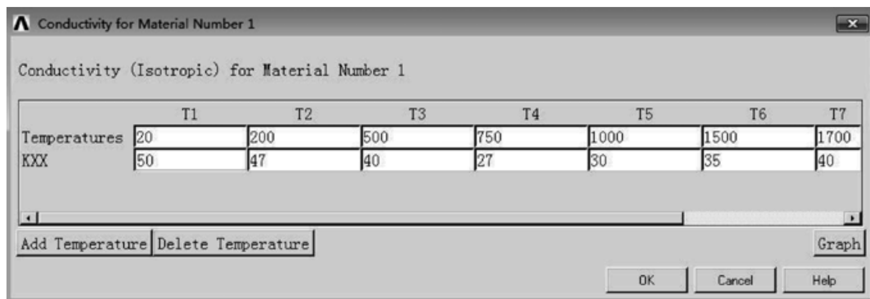


图 4-10　“材料的导热系数”设置面板

5．建立模型

GUI：Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Volumes→Block→By Dimensions。弹出如图 4-11 所示的“创建长方体”设置面板，输入 X1=0，X2=0.18；Y1=0，Y2=0.005；Z1=0，Z2=0.1 后单击“Apply”按钮，继续输入 X1=0.18，X2=0.23；Y1=0，Y2=0.005；Z1=0，Z2=0.15 后单击“Apply”按钮，继续输入 X1=0.23，X2=0.41；Y1=0，Y2=0.005；Z1=0，Z2=0.15，单击“OK”按钮。

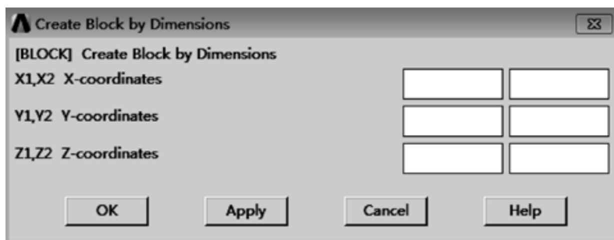


图 4-11　“创建长方体”设置面板

6．划分网格

（1）打开网格划分工具

GUI：Main Menu→Preprocessor→Meshing→MeshTool

（2）设置总体网格尺寸

选择如图 4-12 所示的“网格划分工具”面板中“尺寸控制”子面板中的“Global”选项并单击“Set”按钮，弹出如图 4-13 所示的“总体网格尺寸”设置面板。

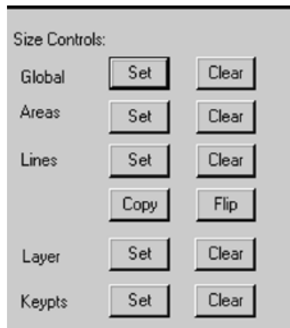


图 4-12　“网格划分工具”面板中“尺寸控制”子面板



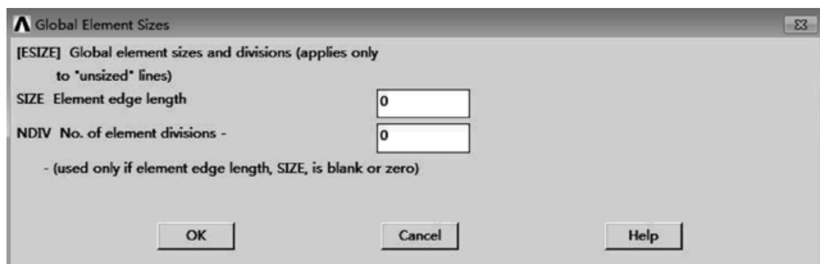


图 4-13 “总体网格尺寸”设置面板

该设置面板中存在两个控制选项，“Element edge length”和“No. of element divisions”，在“Element edge length”输入“0.005”，单击“OK”按钮。

（3）划分网格

单击“网格划分工具”面板上的“Mesh”按钮，弹出“拾取”对话框，单击“Pick All”按钮。

7．生成表面效应单元

（1）选取焊件的顶面节点

GUI：Utility Menu→Select→Entities，弹出如图 4-14 所示的“选取实体”设置面板，设置选取实体类型为“Nodes”，选取方式为“By Location”，输入 Y 的最小坐标值为“0.005”，单击“OK”按钮。

（2）设置单元属性

GUI：Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Elements→Elem Attributes，弹出如图 4-15 所示的“单元属性”设置面板，选择单元类型号为“2 SUEF152”，单击“OK”按钮。

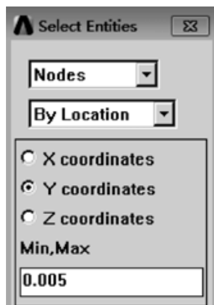


图 4-14 “选取实体”设置面板

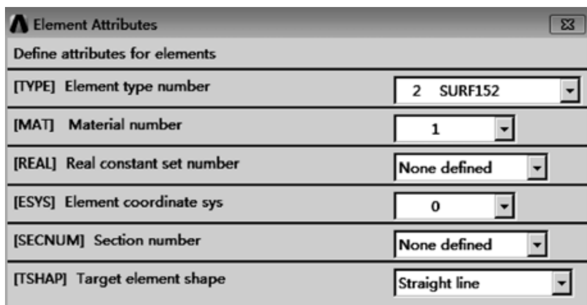


图 4-15 单元属性设置面板

（3）生成表面效应单元

GUI：Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Elements→Surf / Contact→Surf Effect→Generl Surface→No extra Node，弹出拾取对话框，单击“Pick All”按钮。

（4）选择所有实体

GUI：Utility Menu→Select→Everything。

8．定义焊件之间的接触对

（1）打开接触管理器

单击主菜单中的图标，打开如图 4-16 所示的“接触管理器”面板。

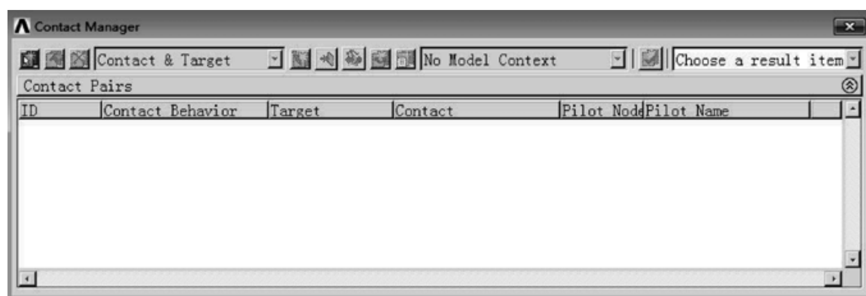


图 4-16 “接触管理器”面板

（2）定义组成第一个焊道焊件之间的接触对

单击接触管理器中的，弹出如图 4-17 所示的“目标面及目标单元类型”设置面板，在该面板中“Target Surface”选择“Areas”，“Target Type”选择“Flexible”，单击“Pick Target”按钮，弹出拾取对话框，拾取面 A6，单击“Apply”按钮，然后单击图 4-17 所示的“Next”，弹出图 4-18 所示的“接触面及接触单元类型”设置面板，在该面板中“Contact Surface”选择“Areas”，“Contact Element Type”选择“Surface-to-Surface”，单击“Pick Contact”按钮，拾取面 A11，单击“Apply”按钮，单击图 4-18 中的“Next”按钮，弹出图 4-19 所示的“创建接触对”面板，单击“Optional settings”按钮，弹出如图 4-20 所示的“接触对属性”设置面板，设置接触面导热系数为“2E6”，单击“OK”按钮，返回如图 4-20 所示“创建接触对”面板，单击“Creat”来创建接触对。



图 4-17 “目标面及目标单元类型”设置面板

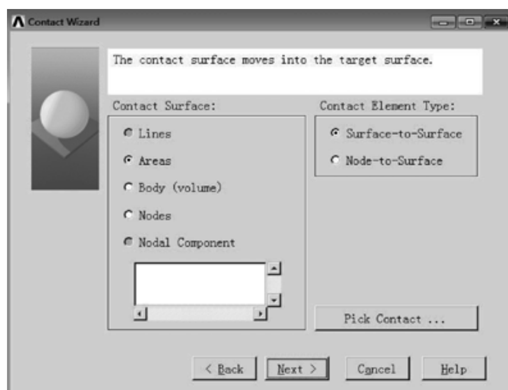


图 4-18 “接触面及接触单元类型”设置面板

（3）定义组成第二个焊道焊件之间的接触对

单击接触管理器中的，弹出如图 4-17 所示的“目标面及目标单元类型”设置面板，在该面板中设置“Target Surface”为“Lines”，“Target Type”选择“Flexible”，单击“Pick Target”按钮，弹出“拾取”对话框，拾取面 A12，单击“Apply”按钮，然后单击图 4-17 所示的“Next”按钮，弹出图 4-18 所示的“接触面及接触单元类型”设置面板，在该面板中“Contact Surface”选择“Areas”，“Contact Element Type”选择“Surface-to-Surface”，单击“Pick Contact”按钮，拾取面 A17，单击“Apply”按钮，再单击图 4-18 中的“Next”按钮，弹出图 4-19 所示的“创建接触对”面板，单击“Optional settings”按

钮，弹出如图 4-20 所示的接触对属性设置面板，设置接触面导热系数为 2E6，单击“OK”按钮，返回如图 4-20 所示创建接触对面板，单击“Creat”按钮来创建接触对。



图 4-19 “创建接触对”面板

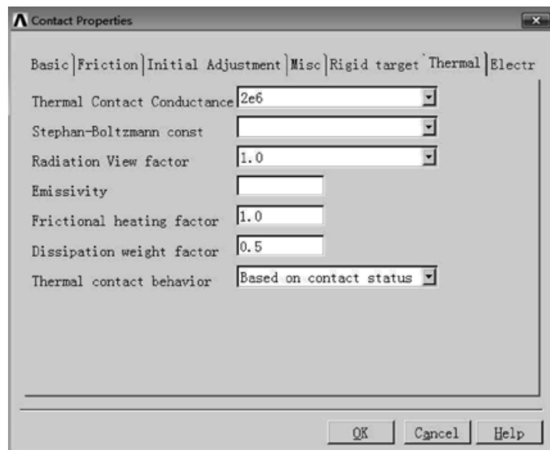


图 4-20 “接触对属性”设置面板

（4）设置焊件之间的粘结温度

GUI：Main Menu→Preprocessor→Real Constants→Add/Edit/Delete→Set 3→Edit→Type 4 CONTA174，单击“OK”按钮，弹出为接触单元 CONTA174 定义的实常数列表，输入“Bonding temperature”为“1000”，单击“OK”按钮，继续单击实常数面板中的“Set 4”，然后单击“Edit”按钮，选择“Type 6 CONTA174”，弹出为接触单元 CONTA174 定义的实常数列表，“Bonding temperature”设为“1000”，单击“OK”按钮。该参数表明当温度达到 1000 时，焊件开始结合在一起。

4.6.2 求解

1．设置分析类型

（1）激活瞬态分析

GUI：Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis，弹出如图 4-21 所示的“分析类型”设置面板，选择“Transient”选项，单击“OK”按钮。

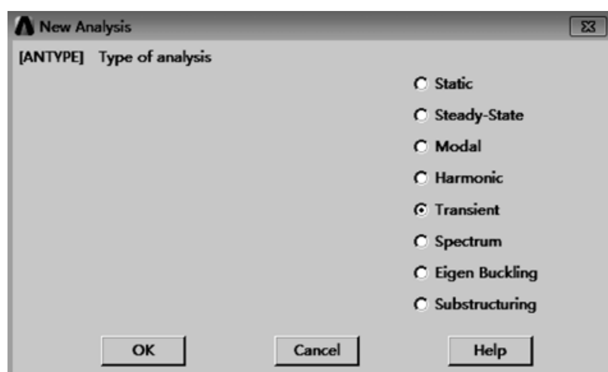


图 4-21 “分析类型”设置面板

（2）设置分析选项

GUI：Main Menu→Preprocessor→Loads→Analysis Type→Analysis Options，弹出如图 4-22 所示的“瞬态分析选项”设置面板，勾选“Large deform effects”复选框，激活大变形分析，其他设置保存默认设置，单击“OK”按钮。

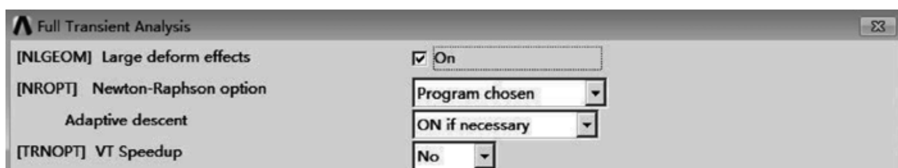


图 4-22 “瞬态分析选项”设置面板

（3）设置方程求解器

GUI：Main Menu→Solution→Analysis Type→Sol'n Controls→Sol'n Options，弹出如图 4-23 所示的“求解选项”设置面板，在“Equation Solvers”选择“Sparse direct”，单击“OK”按钮。

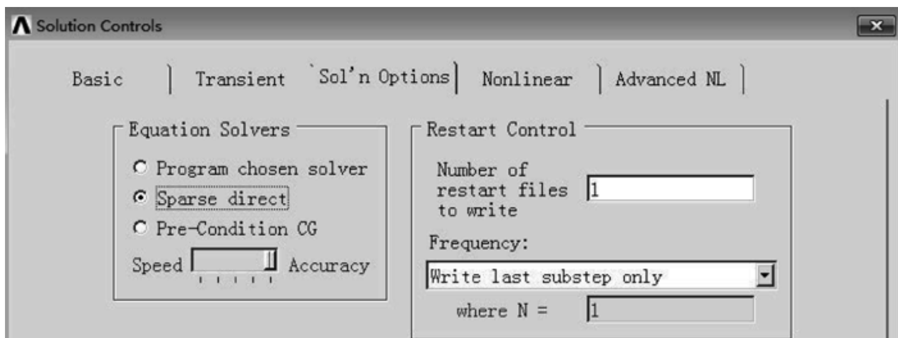


图 4-23 “求解选项”设置面板

2．载荷的基本设置

（1）定义初始均匀温度

GUI：Main Menu→Solution→Define Loads→Settings→Uniform Temp，弹出如图 4-24 所示的“均匀温度”设置面板，模型的“Uniform temperature”设为“20”，单击“OK”按钮。

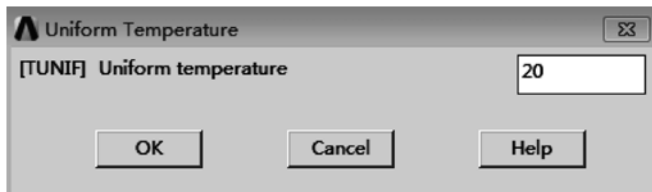


图 4-24 “均匀温度”设置面板

（2）定义模型的参考温度

GUI：Main Menu→Solution→Define Loads→Settings→Reference Temp，弹出如图 4-25 所示的“参考温度”设置面板，“Reference temperature”设为“20”，单击“OK”按钮。

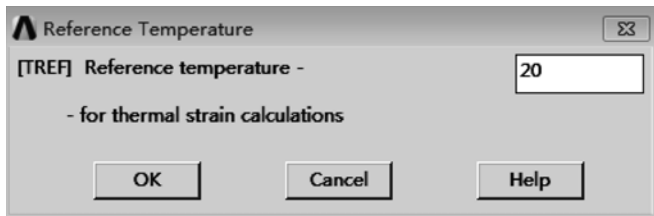
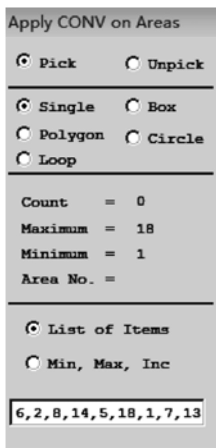


图 4-25 “参考温度”设置面板

3．定义热边界条件

GUI：Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Thermal→Convection→On Areas，弹出如图 4-26 所示的“在面上施加对流换热系数”拾取对话框，输入拾取的面号分别为 4、10、16、2、8、14、5、18、1、7、13，单击“OK”按钮，弹出如图 4-27 所示的“在面上施加对流换热系数”设置面板，“Film coefficient”设为“30”，“Apply Bulk temperature”设为 20，单击“OK“按钮，按照同样操作在面 3、9 和 15 上将“Film coefficient”设为“300”，“Apply Bulk temperature”设为“20”。



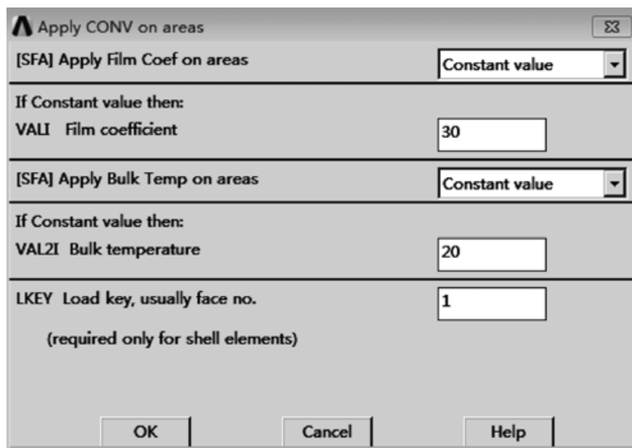


图 4-26 “在面上施加对流换热系数”拾取对话框　　图 4-27 “在面上施加对流换热系数”设置面板

4．定义结构边界条件

（1）完全约束模型的左，右侧面的位移

GUI：Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Areas，弹出“拾取”对话框，拾取面 A5 和 A18，单击“OK”按钮，在弹出的对话框中选择约束类型为“UX”，单击“Apply”按钮；继续拾取面 A5 和 A18，单击“OK”按钮，在弹出的对话框中选择约束类型为“UY”，单击“Apply”；继续拾取面 A5 和 A18，单击“OK”按钮，在弹出的对话框中选择约束类型为“UZ”，单击“OK”按钮。

（2）约束模型底面的 Z 方向位移

GUI：Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Areas，弹出“拾取”对话框，拾取面 A2、A8 和 A14，单击“OK”按钮，在弹出的对话框中选择约束类型为“UZ”，单击“OK”按钮。

（3）约束模型下侧面上的 Y 方向位移

GUI：Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Areas，弹出“拾取”对话框，拾取面 A3、A9 和 A15，单击“OK”按钮，在弹出的对话框中选择约束类型为“UY”，单击“OK”按钮。



5．定义高斯热源

（1）定义第一个焊缝上的高斯热源

1）定义高斯热源函数

GUI：Utility Menu→Parameters→Functions→Define/Edit，弹出“定义函数”面板，在面板 Resule 中输入“Qm×exp(−3×(({X}−0.18)^2+(0.15−V×{TIME}−{Z})^2)/R^2)”。

2）保存函数并命名函数名为 gaosi

选择“函数编辑器”面板上的 File→Save，输入保存文件名为 GAOSI1，单击“保存”按钮。

3）退出函数编辑器

选择“函数编辑器”面板的 File→Exit。

4）读入函数

GUI：Solution→Define Loads→Apply→Functions→Read File，弹出“选择函数文件”对话框，选择 GAOSI1.func，单击“打开”按钮，弹出“函数加载”对话框，在“Table parameter name”中输入“GAOSI1”，在“Constant Values”中输入 Qm 为“QM”，V 为“V”，R 为“R”，单击“OK”按钮。

（2）定义第二个焊缝上的高斯热源

1）定义高斯热源函数

GUI：Utility Menu→Parameters→Functions→Define→Edit，弹出定义函数面板，在面板 Resule 中输入“Qm×exp(−3×(({X}−0.23)^2+(V×({TIME}−15)−{Z})^2)/R^2)”。

2）保存函数并命名函数名为 GAOSI2

选择“函数编辑器”面板上的 File→Save，输入保存文件名为 GAOSI2，单击“保存”按钮。

3）退出函数编辑器

选择“函数编辑器”面板的 File→Exit。

4）读入函数

GUI：Solution→Define Loads→Apply→Functions→Read File，弹出“选择函数文件”对话框，选择“GAOSI2.func”，单击“打开”按钮，弹出“Function Loader”对话框，在“Table parameter name”中输入“GAOSI2”，在“Constant Values”中输入 Qm 为“QM”，V 为“V”，R 为“R”，单击“OK”按钮。

6．定义第 1 个载荷步文件

（1）选取表面效应单元

GUI：Utility Menu→Select→Entities，弹出如图 4-28 所示的“选取实体”设置面板，设置选取实体类型为“Elements”，选取方式为“By Attributes”，“Elem type num”设为“2”，单击“OK”按钮。

（2）在表面效应单元上施加热流密度载荷

GUI：Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Thermal→Heat Flux→On Elements，

弹出“拾取”对话框，单击“Pick All”按钮，弹出如图4-29所示的“在单元施加热流密度”设置面板，“Apply HFLUX on elemts as a”设为“Existing table”，“Face number”设为“1”，单击“OK”按钮，在弹出的对话框中选择“GAOSI1”，单击“OK”按钮。

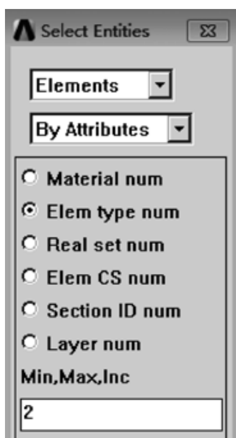


图4-28 “选择实体”设置面板

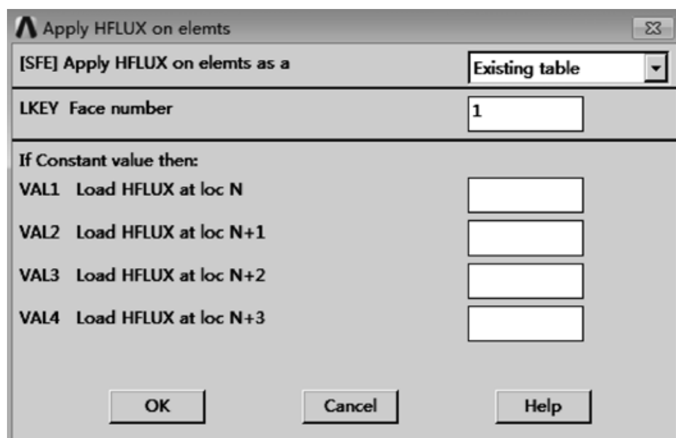


图4-29 “在单元施加热流密度”设置面板

（3）选择所有实体

GUI：Utility Menu→Select→Everything。

（4）设置输出控制

GUI：Main Menu→Solution→Load Step Opts→Output Ctrls→DB/Results File，在弹出的“计算结果输出”控制面板选择“Every substep”选项，单击“OK”按钮。

（5）设置计算时间和子步

GUI：Main Menu→Solution→Load Step Opts→Time/Frequence→Time and Substeps，弹出如图4-30所示的“时间和子步选项”设置面板，“Time at end of load step”设为“15”，“Number of substeps”设为“75”，“Stepped or ramped b.c.”选择“Ramped”，“Time at end of load step”设为“ON”，“Maximumno.of substeps”设为“150”，“Minimum no.of substeps”设为“50”，其他保持默认设置，单击“OK”按钮。

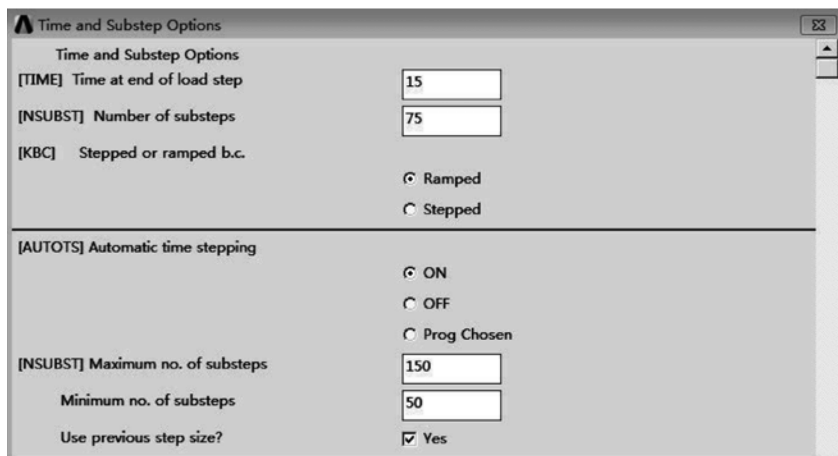


图4-30 “时间和子步选项”设置面板

（6）写入第一个载荷步文件

GUI：Main Menu→Solution→Load Step Opts→Write LS File，弹出如图 4-31 所示的“写入载荷步文件”设置面板，“Load Step file number n”设为“1”，单击“OK”按钮。

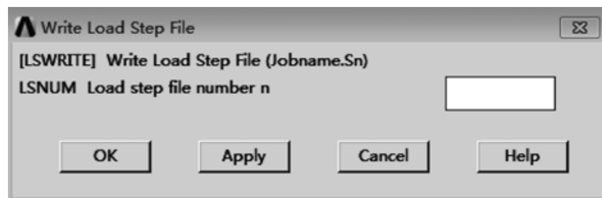


图 4-31 “写入载荷步文件”设置面板

7．定义第 2 个载荷步文件

（1）选取表面效应单元

GUI：Utility Menu→Select→Entities，弹出如图 4-28 所示的“选择实体”设置面板，设置选取实体类型为“Elements”，选取方式为“By Attributes”，“Elem type num”设为“2”，单击“OK”按钮。

（2）删除所有热流密度载荷

GUI：Main Menu→Solution→Define Loads→Delete→Thermal→Heat Flux→On Elements，弹出“拾取”对话框，单击“Pick All”按钮。

（3）在表面效应单元上施加热流密度载荷

GUI：Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Thermal→Heat Flux→On Elements，弹出“拾取”对话框，单击“Pick All”按钮，弹出如图 4-29 所示的“在单元施加热流密度”设置面板，“Apply HFLUX on elemts as a”选择“Existing table”，“Face number”设为“1”，单击“OK”按钮，在弹出的对话框中选择“GAOSI2”，单击“OK”按钮。

（4）选择所有实体

GUI：Utility Menu→Select→Everything。

（5）设置计算时间和子步

GUI：Main Menu→Solution→Load Step Opts→Time/Frequence→Time and Substeps，弹出如图 4-30 所示的“时间和子步选项”设置面板，“Time at end of load step”设为“30”，“Number of substeps”设为“75”，“Stepped or ramped b.c”选择“Ramped”，“Automatic time stepping”选择“ON”，“Maximum no.of substeps”设为“150”，“Minimum no.of substeps”设为“50”，其他保持默认设置，单击“OK”按钮。

（6）写入第二个载荷步文件

GUI：Main Menu→Solution→Load Step Opts→Write LS File，弹出如图 4-31 所示的“写入载荷步文件”设置面板，“Load Step file number n”设为“2”，单击“OK”按钮。

8．定义第 3 个载荷步文件

（1）选取表面效应单元

GUI：Utility Menu→Select→Entities，弹出如图 4-28 所示的“选择实体”设置面板，设置选取实体类型为“Elements”，选取方式为“By Attributes”，“Elem type num”设为“2”，单击“OK”按钮。

（2）删除表面效应单元上施加的热流密度载荷

GUI： Main Menu→Solution→Define Loads→Delete→Thermal→Heat Flux→On Elements，弹出拾取对话框，单击“Pick All”按钮。

（3）选择所有实体

GUI：Utility Menu→Select→Everything。

（4）设置计算时间和子步

GUI：Main Menu→Solution→Load Step Opts→Time/Frequence→Time and Substeps，弹出如图 4-30 所示的“时间和子步选项”设置面板，“Time at end of load Step”设为“200”，“Number of substeps”设为“600”，“Minimum no.of substeps”设为“50”，其他保持默认设置，单击“OK”按钮。

（5）写入第三个载荷步文件

GUI：Main Menu→Solution→Load Step Opts→Write LS File，弹出如图 4-31 所示的“写入载荷步文件”设置面板，“Load step file number n”设为“3”，单击“OK”按钮。

9．定义第 4 个载荷步文件

（1）选择所有实体

GUI：Utility Menu→Select→Everything。

（2）设置计算时间和子步

GUI：Main Menu→Solution→Load Step Opts→Time/Frequence→Time and Substeps，弹出如图 4-30 所示的“时间和子步选项”设置面板，“Time at end of load step”设为“3600”，“Number of substeps”设为“100”，“Maximum no.of substeps”设为“150”，“Minimum no.of substeps”设为“50”，其他保持默认设置，单击“OK”按钮。

（3）写入第四个载荷步文件

GUI：Main Menu→Solution→Load Step Opts→Write LS File，弹出如图 4-31 所示的“写入载荷步文件”设置面板，“Load step file number n”设为“4”，单击“OK”按钮。

10．求解

GUI：Main Menu→Solution→Solve→From LS Files，弹出如图 4-32 所示的“求解载荷步文件”设置面板，“Starting LS file number”设为“1”，“Ending LS file number”设为“4”，“File number increment”设为“1”，单击“OK”按钮。

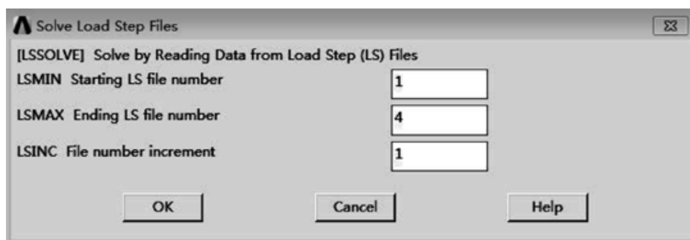


图 4-32　求解载荷步文件设置面板

4.6.3 后处理

图 4-33～图 4-52 给出了焊接过程中不同时刻温度和等效应力云图，图 4-53～图 4-58

给出了焊接过程中焊件的焊接状态云图，图 4-59～图 4-62 给出了不同节点处温度和等效应力与时间的关系，查看方法，用户可以参见本实例的视频操作。

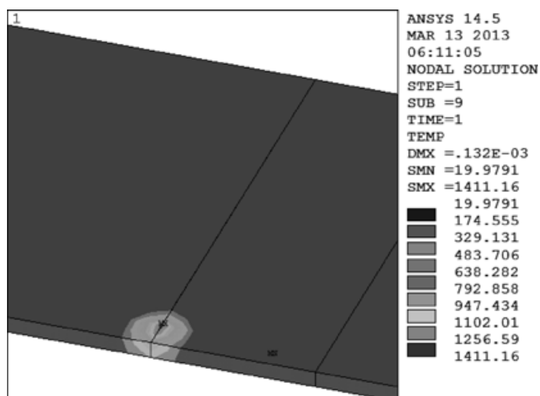


图 4-33　时间 1s 时刻的焊接温度云图

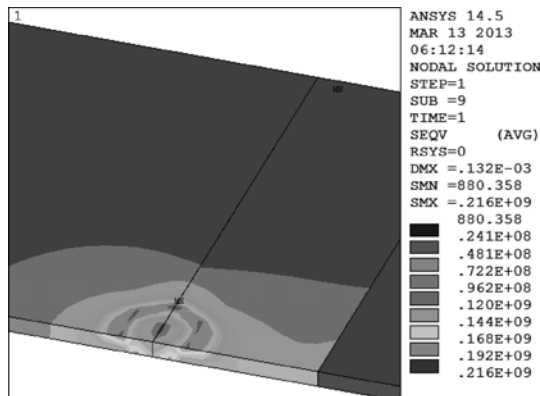


图 4-34　时间 1s 时刻的焊接等效应力云图

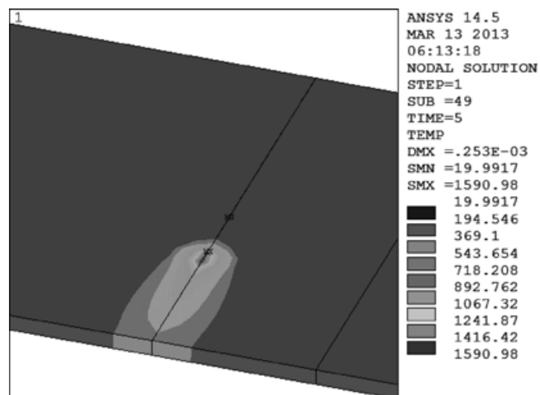


图 4-35　时间 5s 时刻的焊接温度云图

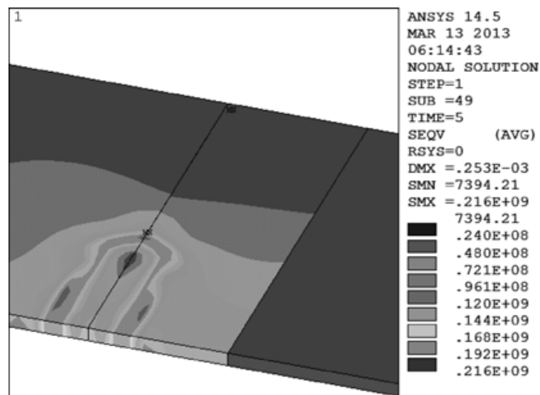


图 4-36　时间 5s 时刻的焊接等效应力云图

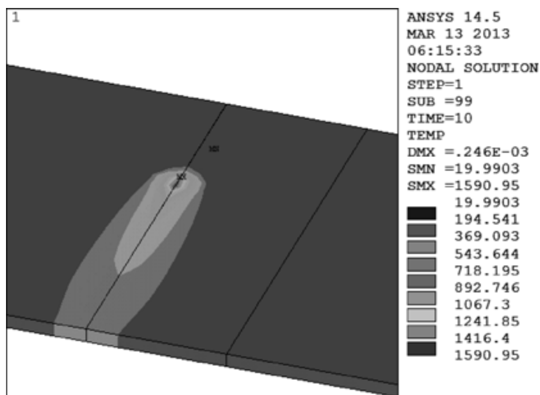


图 4-37　时间 10s 时刻的焊接温度云图

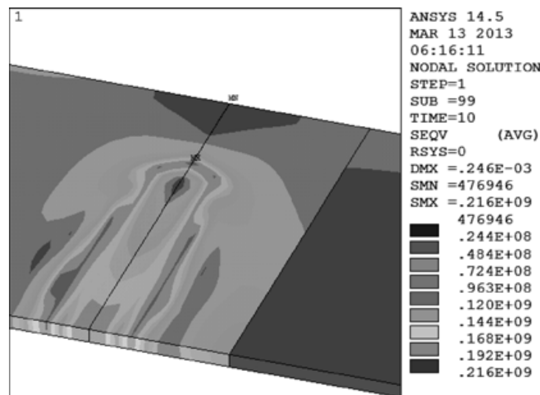


图 4-38　时间 10s 时刻的焊接等效应力云图

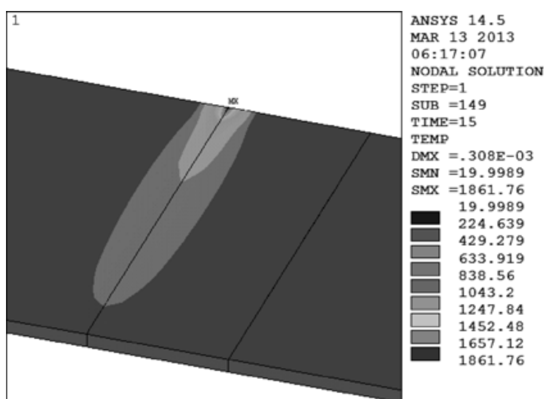


图 4-39　时间 15s 时刻的焊接温度云图

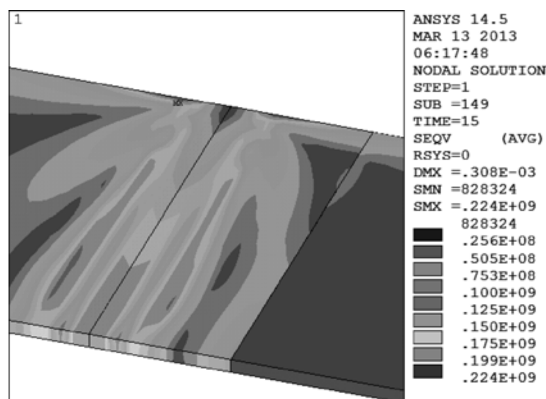


图 4-40　时间 15s 时刻的焊接等效应力云图

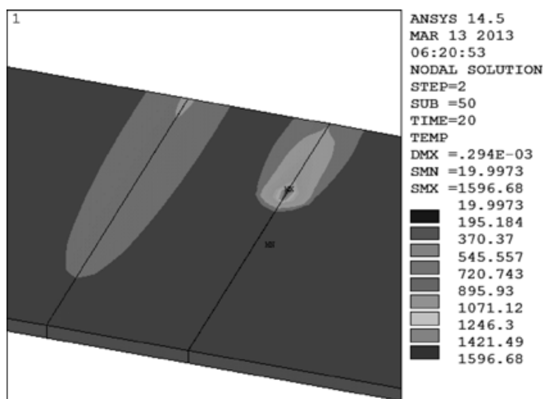


图 4-41　时间 20s 时刻的焊接温度云图

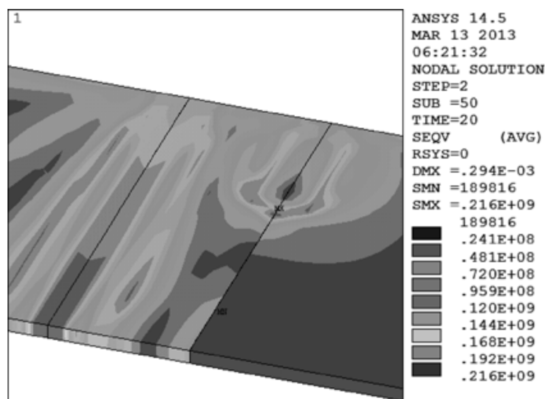


图 4-42　时间 20s 时刻的焊接等效应力云图

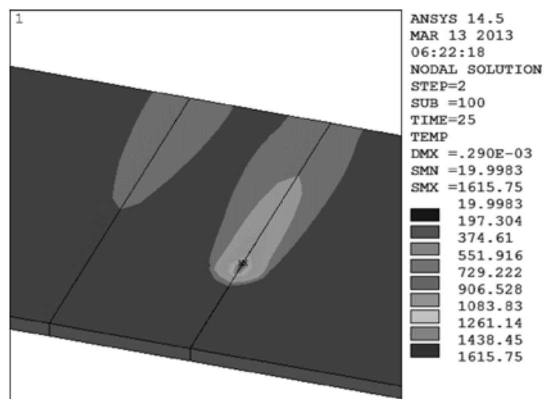


图 4-43　时间 25s 时刻的焊接温度云图

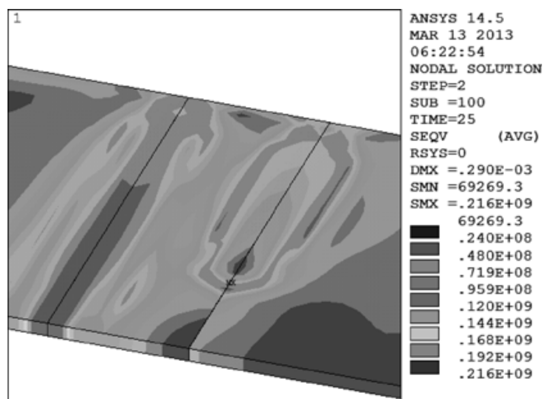


图 4-44　时间 25s 时刻的焊接等效应力云图

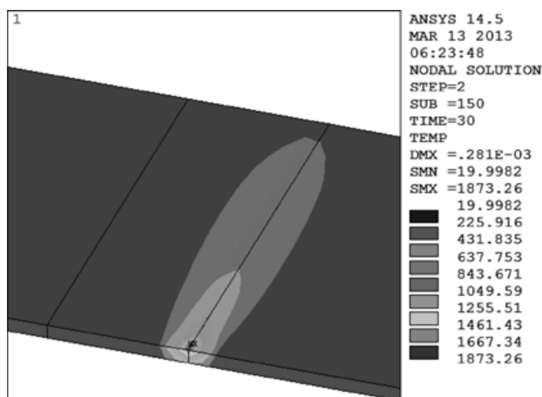


图 4-45　时间 30s 时刻的焊接温度云图

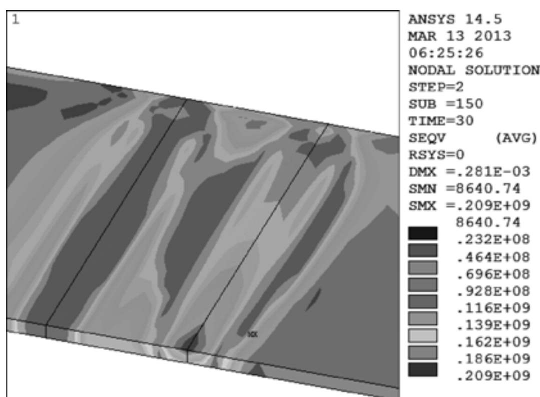


图 4-46　时间 30s 时刻的焊接等效应力云图

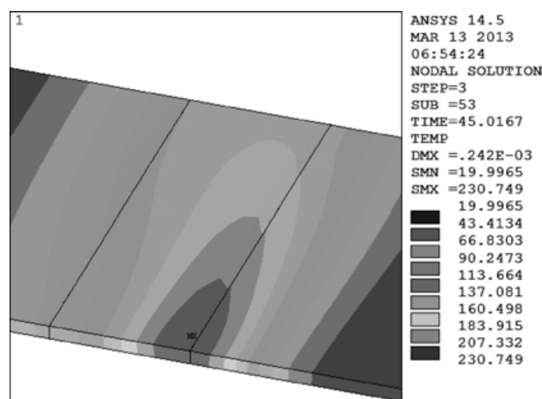


图 4-47　时间 45s 时刻的焊接温度云图

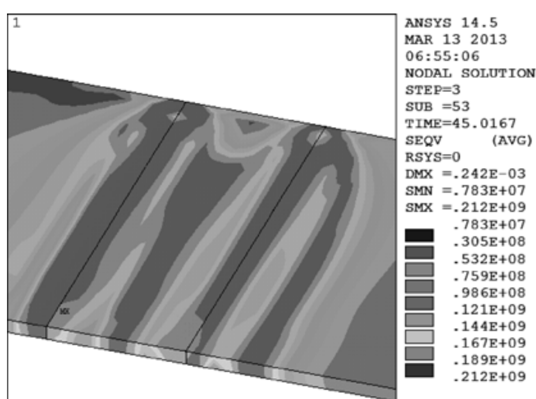


图 4-48　时间 45s 时刻的焊接等效应力云图

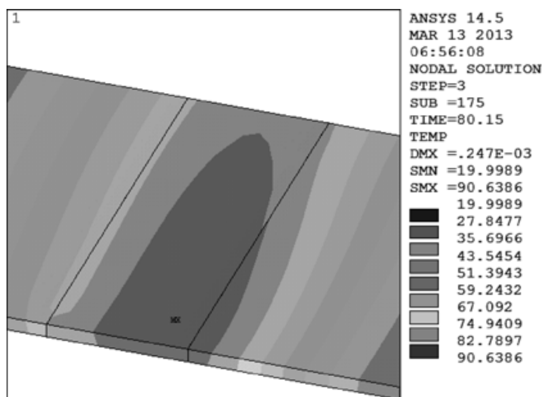


图 4-49　时间 80s 时刻的焊接温度云图

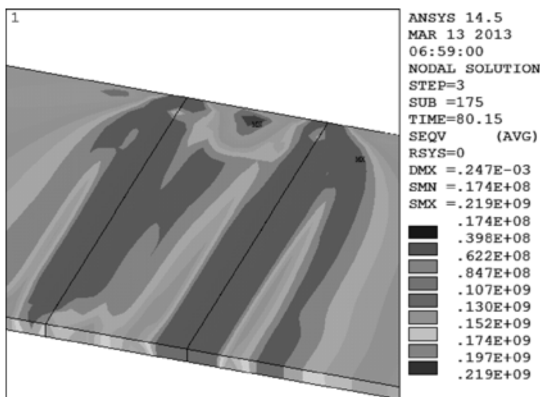


图 4-50　时间 80s 时刻的焊接等效应力云图



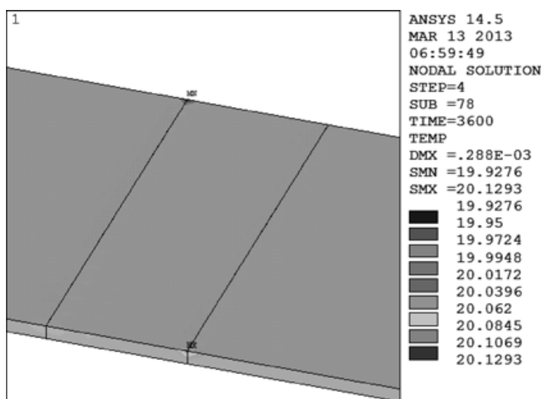


图 4-51　时间 3600s 时刻的焊接温度云图

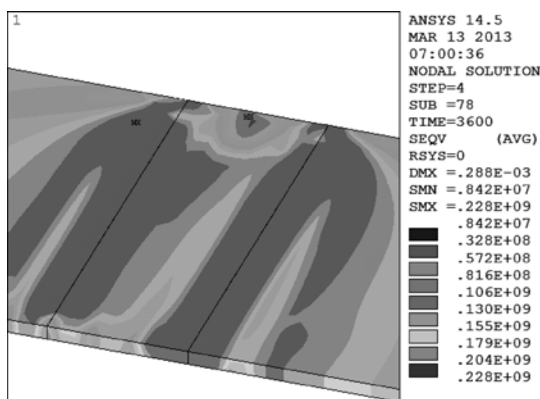


图 4-52　时间 3600s 时刻的焊接等效应力云图

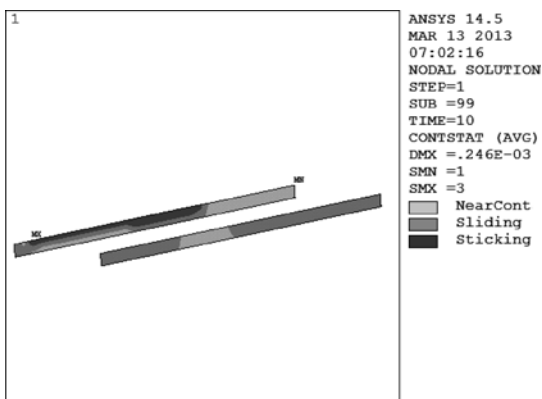


图 4-53　时间 10s 时刻的焊件之间的焊接状态

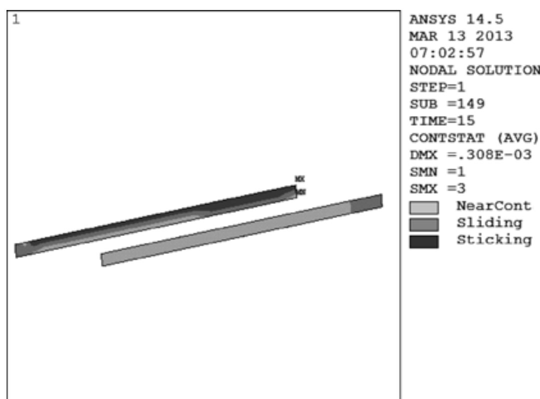


图 4-54　时间 15s 时刻的焊件之间的焊接状态

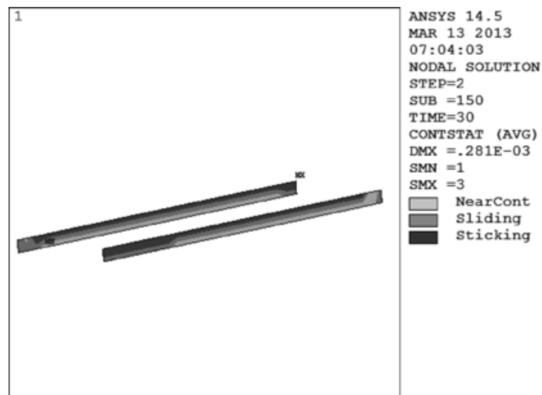


图 4-55　时间 30s 时刻的焊件之间的焊接状态

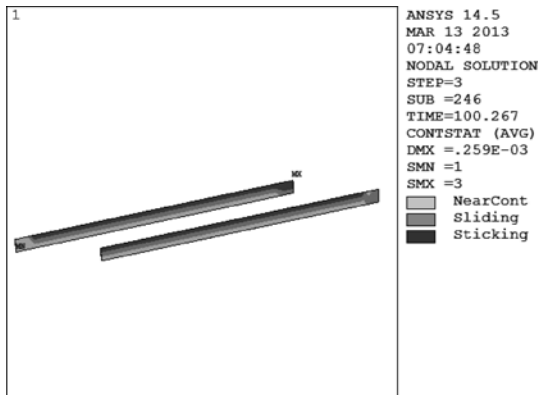


图 4-56　时间 30s 时刻的焊件之间的焊接状态

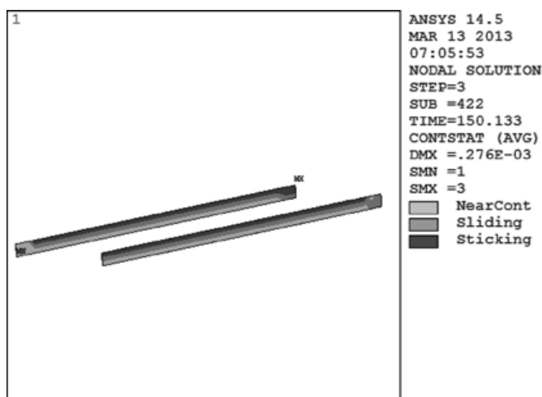


图 4-57 时间 150s 时刻的焊件之间的焊接状态

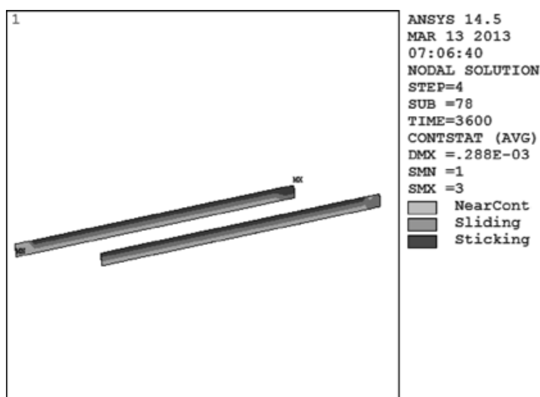


图 4-58 时间 3600s 时刻的焊件之间的焊接状态

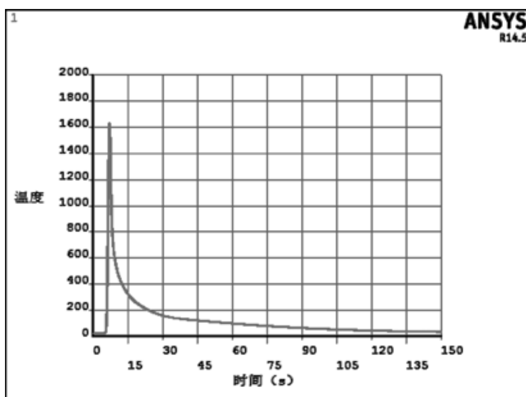


图 4-59 3626 节点处温度与时间的关系

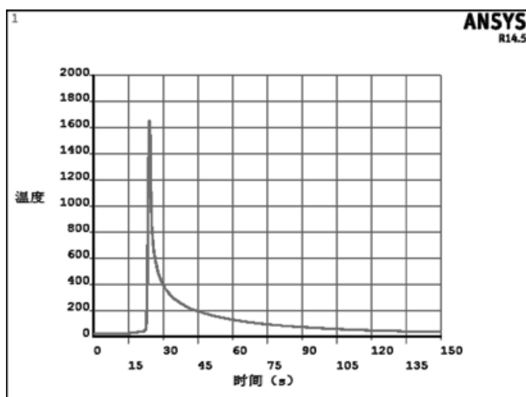


图 4-60 8973 节点处温度与时间的关系

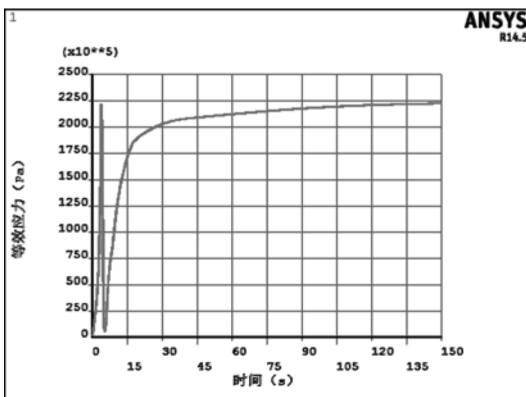


图 4-61 3633 节点处等效应力与时间的关系

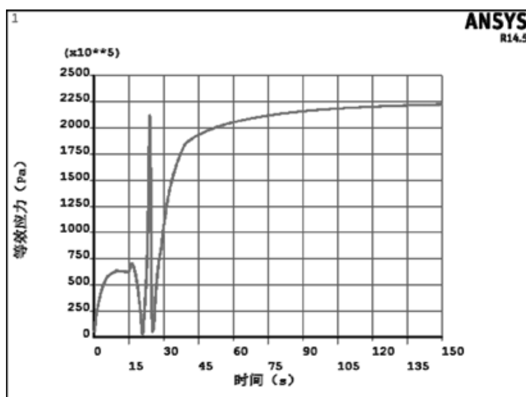


图 4-62 8978 节点处等效应力与时间的关系

4.7 命令流

```
/FILNAME,Welding residual stress,0
!进入前处理
/PREP7
ET,1,SOLID226,11            !定义热-结构耦合单元
ET,2,SURF152                !定义结构的表面效应单元
KEYOPT,2,8,1                !设置表面效应单元关键字

U=22                        !焊接电压
I=150                       !焊接电流
V=0.01                      !焊接速度
YITA=0.7                    !焊接热效率
R=0.008                     !电弧有效加热半径
Q=U*I*YITA                  !电弧热功率
Qm=3/3.1415/R**2*Q          !加热斑点中心最大热流密度
!设置材料参数
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,20
MPTEMP,2,200
MPTEMP,3,500
MPTEMP,4,750
MPTEMP,5,1000
MPTEMP,6,1500
MPTEMP,7,1700
MPTEMP,8,2500

MPDATA,KXX,1,,50
MPDATA,KXX,1,,47
MPDATA,KXX,1,,40
MPDATA,KXX,1,,27
MPDATA,KXX,1,,30
MPDATA,KXX,1,,35
MPDATA,KXX,1,,40
MPDATA,KXX,1,,55

MPDATA,DENS,1,,7820
MPDATA,DENS,1,,7700
MPDATA,DENS,1,,7610
MPDATA,DENS,1,,7550
MPDATA,DENS,1,,7490
MPDATA,DENS,1,,7350
MPDATA,DENS,1,,7300
MPDATA,DENS,1,,7090
```



```
MPDATA,C,1,,460
MPDATA,C,1,,480
MPDATA,C,1,,530
MPDATA,C,1,,675
MPDATA,C,1,,670
MPDATA,C,1,,660
MPDATA,C,1,,780
MPDATA,C,1,,820

MPDATA,EX,1,,2.05E11
MPDATA,EX,1,,1.87E11
MPDATA,EX,1,,1.5E11
MPDATA,EX,1,,0.7E11
MPDATA,EX,1,,0.2E11
MPDATA,EX,1,,0.19E2
MPDATA,EX,1,,0.18E2
MPDATA,EX,1,,0.12e2

MPDATA,PRXY,1,,0.28
MPDATA,PRXY,1,,0.29
MPDATA,PRXY,1,,0.31
MPDATA,PRXY,1,,0.35
MPDATA,PRXY,1,,0.4
MPDATA,PRXY,1,,0.45
MPDATA,PRXY,1,,0.48
MPDATA,PRXY,1,,0.5

UIMP,1,REFT,,,20
MPDATA,ALPX,1,,1.1e-5
MPDATA,ALPX,1,,1.22e-5
MPDATA,ALPX,1,,1.39e-5
MPDATA,ALPX,1,,1.48e-5
MPDATA,ALPX,1,,1.34e-5
MPDATA,ALPX,1,,1.33e-5
MPDATA,ALPX,1,,1.32e-5
MPDATA,ALPX,1,,1.31e-5


TB,BISO,1,6,2,
TBTEMP,20
TBDATA,,225e6,0,,,,
TBTEMP,250
TBDATA,,185e6,0,,,,
TBTEMP,500
TBDATA,,85e6,0,,,,
TBTEMP,750
```

```
TBDATA,,45E6,0,,,,
TBTEMP,1000
TBDATA,,15E6,0,,,,
TBTEMP,1500
TBDATA,,1E-5,0,,,,
!建立模型
BLOCK,0,0.18,0,0.005,0,0.15,
BLOCK,0.18,0.23,0,0.005,0,0.15,
BLOCK,0.23,0.41,0,0.005,0,0.15,
!划分网格
ESIZE,0.005
VMESH,ALL
!生成表面效应单元
NSEL,ALL
NSEL,S,LOC,Y,0.005
NPLOT
TYPE,    2
MAT,         1
REAL,
ESYS,        0
SECNUM,
TSHAP,LINE

ESURF,0

ALLSEL,ALL
!定义焊件之间的接触对
!具体的操作步骤，用户可以参见本章的视频教程
R,3,0,0,1, 0.1,0,0
RMORE,0,0,1e+020, 0,1,0
RMORE,0,2000000,1, 0,1,0.5
RMORE,,,1, 0,0,
RMORE,,,,,,
RMORE,,,,,1000
R,4,0,0,0, 0,0,0
RMORE,0,0,0, 0,0,0
RMORE,0,2000000,0, 0,0,0
RMORE,,,0, 0,0,
RMORE,,,,,,
RMORE,,,,,1000
!进入求解
/SOL
ANTYPE,4              !设置分析类型为瞬态热-结构分析
TRNOPT,FULL           !使用完全法完成瞬态分析
NLGEOM,1              !激活大变形分析
!设置求解器
```



```
EQSLV,SPAR
TUNIF,20,        !设置模型的初始均匀温度
TREF,20,         !设置模型的参考温度
!定义对流边界条件
SFA,4, ,CONV,30,20
SFA,10, ,CONV,30,20
SFA,16, ,CONV,30,20
SFA,2, ,CONV,30,20
SFA,8, ,CONV,30,20
SFA,14, ,CONV,30,20
SFA,5, ,CONV,30,20
SFA,18, ,CONV,30,20
SFA,1, ,CONV,30,20
SFA,7, ,CONV,30,20
SFA,13, ,CONV,30,20
SFA,3, ,CONV,300,20
SFA,9, ,CONV,300,20
SFA,15, ,CONV,300,20
!定义结构约束
DA,5,UX,
DA,5,UY,
DA,5,UZ,
DA,18,UX,
DA,18,UY,
DA,18,UZ,
DA,3,UY,
DA,9,UY,
DA,15,UY,
DA,2,UZ,
DA,8,UZ,
DA,14,UZ,
!定义函数
*DEL,_FNCNAME
*DEL,_FNCMTID
*DEL,_FNC_C1
*DEL,_FNC_C2
*DEL,_FNC_C3
*DEL,_FNCCSYS
*SET,_FNCNAME,'gaosi1'
*DIM,_FNC_C1,,1
*DIM,_FNC_C2,,1
*DIM,_FNC_C3,,1
*SET,_FNC_C1(1),qm
*SET,_FNC_C2(1),v
*SET,_FNC_C3(1),r
*SET,_FNCCSYS,0
```

```
! /INPUT,gaosi1.func,,,1
*DIM,%_FNCNAME%,TABLE,6,23,1,,,,%_FNCCSYS%
!
! Begin of equation:   Qm*exp(-3*(({X}-0.18)^2+(0.15-V*{TIME}-{Z})^2)/R^2)
*SET,%_FNCNAME%(0,0,1), 0.0, -999
*SET,%_FNCNAME%(2,0,1), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(3,0,1), %_FNC_C1(1)%
*SET,%_FNCNAME%(4,0,1), %_FNC_C2(1)%
*SET,%_FNCNAME%(5,0,1), %_FNC_C3(1)%
*SET,%_FNCNAME%(6,0,1), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(0,1,1), 1.0, -1, 0, 0, 0, 0, 0
*SET,%_FNCNAME%(0,2,1), 0.0, -2, 0, 1, 0, 0, -1
*SET,%_FNCNAME%(0,3,1),      0, -3, 0, 1, -1, 2, -2
*SET,%_FNCNAME%(0,4,1), 0.0, -1, 0, 3, 0, 0, -3
*SET,%_FNCNAME%(0,5,1), 0.0, -2, 0, 1, -3, 3, -1
*SET,%_FNCNAME%(0,6,1), 0.0, -1, 0, 0.18, 0, 0, 2
*SET,%_FNCNAME%(0,7,1), 0.0, -3, 0, 1, 2, 2, -1
*SET,%_FNCNAME%(0,8,1), 0.0, -1, 0, 2, 0, 0, -3
*SET,%_FNCNAME%(0,9,1), 0.0, -4, 0, 1, -3, 17, -1
*SET,%_FNCNAME%(0,10,1), 0.0, -1, 0, 1, 18, 3, 1
*SET,%_FNCNAME%(0,11,1), 0.0, -3, 0, 0.15, 0, 0, -1
*SET,%_FNCNAME%(0,12,1), 0.0, -5, 0, 1, -3, 2, -1
*SET,%_FNCNAME%(0,13,1), 0.0, -1, 0, 1, -5, 2, 4
*SET,%_FNCNAME%(0,14,1), 0.0, -3, 0, 2, 0, 0, -1
*SET,%_FNCNAME%(0,15,1), 0.0, -5, 0, 1, -1, 17, -3
*SET,%_FNCNAME%(0,16,1), 0.0, -1, 0, 1, -4, 1, -5
*SET,%_FNCNAME%(0,17,1), 0.0, -3, 0, 1, -2, 3, -1
*SET,%_FNCNAME%(0,18,1), 0.0, -1, 0, 2, 0, 0, 19
*SET,%_FNCNAME%(0,19,1), 0.0, -2, 0, 1, 19, 17, -1
*SET,%_FNCNAME%(0,20,1), 0.0, -1, 0, 1, -3, 4, -2
*SET,%_FNCNAME%(0,21,1), 0.0, -1, 7, 1, -1, 0, 0
*SET,%_FNCNAME%(0,22,1), 0.0, -2, 0, 1, 17, 3, -1
*SET,%_FNCNAME%(0,23,1), 0.0, 99, 0, 1, -2, 0, 0
! End of equation:   Qm*exp(-3*(({X}-0.18)^2+(0.15-V*{TIME}-{Z})^2)/R^2)
!-->
*DEL,_FNCNAME
*DEL,_FNCMTID
*DEL,_FNC_C1
*DEL,_FNC_C2
*DEL,_FNC_C3
*DEL,_FNCCSYS
*SET,_FNCNAME,'GAOSI2'
*DIM,_FNC_C1,,1
*DIM,_FNC_C2,,1
*DIM,_FNC_C3,,1
*SET,_FNC_C1(1),QM
```



```
*SET,_FNC_C2(1),V
*SET,_FNC_C3(1),R
*SET,_FNCCSYS,0
! /INPUT,GAOSI2.func,,,1
*DIM,%_FNCNAME%,TABLE,6,23,1,,,,%_FNCCSYS%
!
! Begin of equation: Qm*exp(-3*(({X}-0.23)^2+(V*({TIME}-15)-{Z})^2)/R^2)
*SET,%_FNCNAME%(0,0,1), 0.0, -999
*SET,%_FNCNAME%(2,0,1), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(3,0,1), %_FNC_C1(1)%
*SET,%_FNCNAME%(4,0,1), %_FNC_C2(1)%
*SET,%_FNCNAME%(5,0,1), %_FNC_C3(1)%
*SET,%_FNCNAME%(6,0,1), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(0,1,1), 1.0, -1, 0, 0, 0, 0, 0
*SET,%_FNCNAME%(0,2,1), 0.0, -2, 0, 1, 0, 0, -1
*SET,%_FNCNAME%(0,3,1),      0, -3, 0, 1, -1, 2, -2
*SET,%_FNCNAME%(0,4,1), 0.0, -1, 0, 3, 0, 0, -3
*SET,%_FNCNAME%(0,5,1), 0.0, -2, 0, 1, -3, 3, -1
*SET,%_FNCNAME%(0,6,1), 0.0, -1, 0, 0.23, 0, 0, 2
*SET,%_FNCNAME%(0,7,1), 0.0, -3, 0, 1, 2, 2, -1
*SET,%_FNCNAME%(0,8,1), 0.0, -1, 0, 2, 0, 0, -3
*SET,%_FNCNAME%(0,9,1), 0.0, -4, 0, 1, -3, 17, -1
*SET,%_FNCNAME%(0,10,1), 0.0, -1, 0, 15, 0, 0, 1
*SET,%_FNCNAME%(0,11,1), 0.0, -3, 0, 1, 1, 2, -1
*SET,%_FNCNAME%(0,12,1), 0.0, -1, 0, 1, 18, 3, -3
*SET,%_FNCNAME%(0,13,1), 0.0, -3, 0, 1, -1, 2, 4
*SET,%_FNCNAME%(0,14,1), 0.0, -1, 0, 2, 0, 0, -3
*SET,%_FNCNAME%(0,15,1), 0.0, -5, 0, 1, -3, 17, -1
*SET,%_FNCNAME%(0,16,1), 0.0, -1, 0, 1, -4, 1, -5
*SET,%_FNCNAME%(0,17,1), 0.0, -3, 0, 1, -2, 3, -1
*SET,%_FNCNAME%(0,18,1), 0.0, -1, 0, 2, 0, 0, 19
*SET,%_FNCNAME%(0,19,1), 0.0, -2, 0, 1, 19, 17, -1
*SET,%_FNCNAME%(0,20,1), 0.0, -1, 0, 1, -3, 4, -2
*SET,%_FNCNAME%(0,21,1), 0.0, -1, 7, 1, -1, 0, 0
*SET,%_FNCNAME%(0,22,1), 0.0, -2, 0, 1, 17, 3, -1
*SET,%_FNCNAME%(0,23,1), 0.0, 99, 0, 1, -2, 0, 0
! End of equation: Qm*exp(-3*(({X}-0.23)^2+(V*({TIME}-15)-{Z})^2)/R^2)
!-->
!定义第 1 个载荷步文件
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,2
EPLOT
SFE,all,1,HFLUX, , %GAOSI1%
ALLSEL,ALL
OUTRES,ALL,ALL,
TIME,15
```

```
AUTOTS,1
NSUBST,75,150,50,1
KBC,0
LSWRITE,1
!定义第 2 个载荷步文件
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,2
EPLOT
SFEDELE,ALL,1,HFLUX
SFE,all,1,HFLUX, , %GAOSI2%
ALLSEL,ALL
TIME,30
AUTOTS,1
NSUBST,75,150,50,1
KBC,0
LSWRITE,2
!定义第 3 个载荷步文件
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,2
EPLOT
SFEDELE,ALL,1,HFLUX
ALLSEL,ALL
TIME,200
AUTOTS,1
NSUBST,600,,50,1
KBC,0
LSWRITE,3
!定义第 4 个载荷步文件
TIME,3600
AUTOTS,1
NSUBST,100,150,50,1
KBC,0
LSWRITE,4
!使用载荷步文件求解
LSSOLVE,1,4,1
```

第 5 例　含强化纤维的复合材料管道



5.1　实例覆盖的知识点

读者通过学习该实例可以掌握如下 ANSYS 的知识点。

1）静力学分析的基本步骤。

2）建立复合材料模型的方法。

3）建立强化纤维单元的方法。

4）定义复合材料失效准则的方法。

5）网格划分控制技术。

6）激活大变形的方法。

5.2　模型

图 5-1 给出了复合材料管道的截面图，几何尺寸如图所示，单位为 mm，管道的长度为 1.2m，该复合材料管道在厚度方向为四层，每一层的厚度为 3mm，从底层到顶层的铺层角分别为-45，45，-45，45。

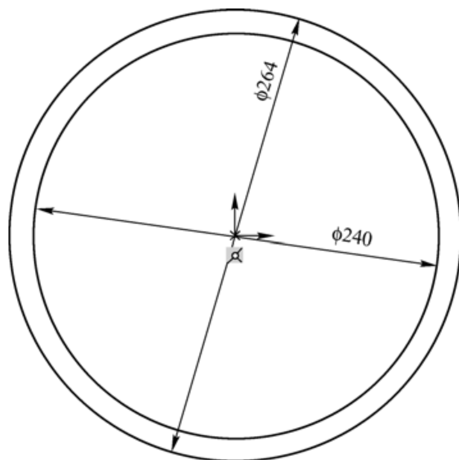


图 5-1　管道的横截面

5.3 单元

本实例选用 SHELL281 单元，模拟复合材料管道，使用 REINF265 单元模拟复合材料管道中的金属强化纤维。

5.4 材料参数

复合材料的参数如下：EX=190E9Pa，EY=19.3E9Pa，EZ=19.3E9Pa，PRXY=0.28，PRYZ=0.28，PRXZ=0.28，GXY=507E9Pa，GYZ=7.17E9Pa，GXZ=7.17E9Pa。强化纤维的弹性模量为 2.1E11Pa，泊松比为 0.3。

5.5 边界条件和载荷

如图 5-2 所示的管道三维模型，约束管道端面上的平动位移约束，在管道内部施加压力 20E6Pa。

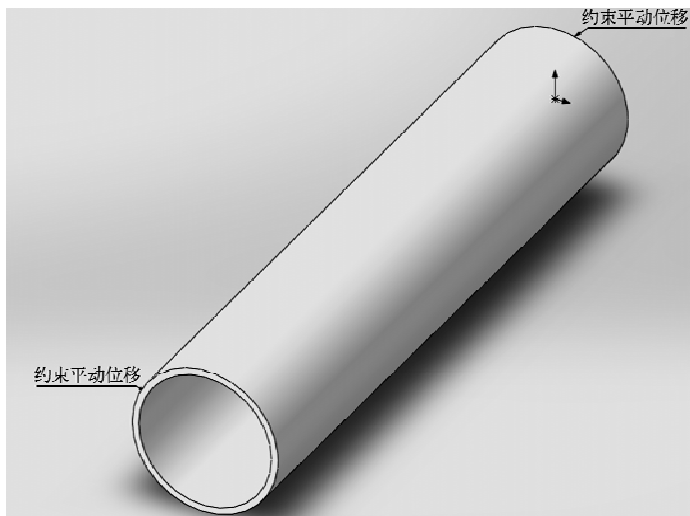


图 5-2　管道的三维模型

5.6 GUI 操作

5.6.1 前处理

1．定义文件名

GUI：Utility Menu→File→Change Jobname，弹出一个对话框，在输入栏中输入“Pipeline failure analysis”，单击“OK”按钮。

2．选择单元

（1）定义单元

GUI：Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete，弹出对话框，单击“Add”按钮，弹出如图 5-3 所示的“单元类型选择”对话框，在弹出对话框的左边选择“SHELL”，然后在右边选择“8node 281”单元，单击“OK”按钮。

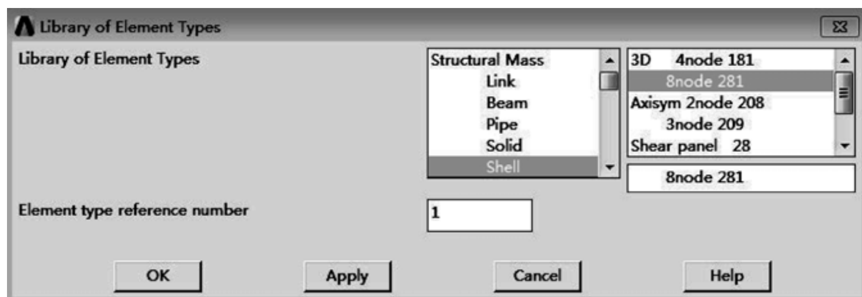


图 5-3 “单元类型选择”对话框

（2）设置单元关键字

在单元类型对话框中选择“SHELL281”，然后选择“Options”选项，在弹出的图 5-4 所示的“SHELL281 单元关键字”设置面板中设置“Storage of layer data”为“All layers+Middle”，单击“OK”按钮；返回单元类型界面，然后单击“Close”按钮关闭对话框。

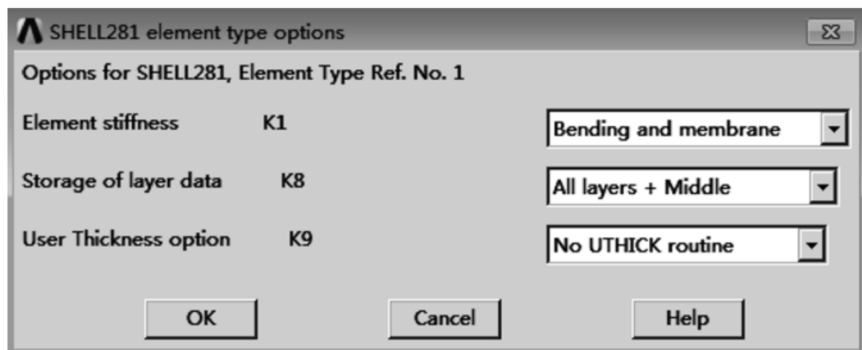


图 5-4 “SHELL281 单元关键字”设置面板

3．定义材料模型

（1）复合材料管道的材料参数

GUI：Main Menu→Preprocessor→Material Props→Material Models，弹出一个对话框，单击 Structural→Linear→Elastic→Orthotropic，弹出如图 5-5 所示的“正交各向异性材料参数”设置面板，输入 EX 为“1.9E11”、EY 为“1.93E10”，EZ 为“1.93E10”，PRXY 为“0.28”，PRYZ 为“0.28”，PRXZ 为“0.28”，GXY 为“5.07E11”，GYZ 为“7.17E9”，GXZ 为“7.17E9”，单击“OK”按钮。

（2）定义强化纤维的材料参数

选择 Material→New Model，单击“OK”按钮。GUI：Main Menu→Preprocessor→Material Props→Material Models，弹出一个对话框，单击 Structural→Linear→Elastic→Isotropic，在弹出



的面板中输入 EX 为“2.1E11”、PRXY 为“0.3”，单击“OK”按钮关闭对话框。

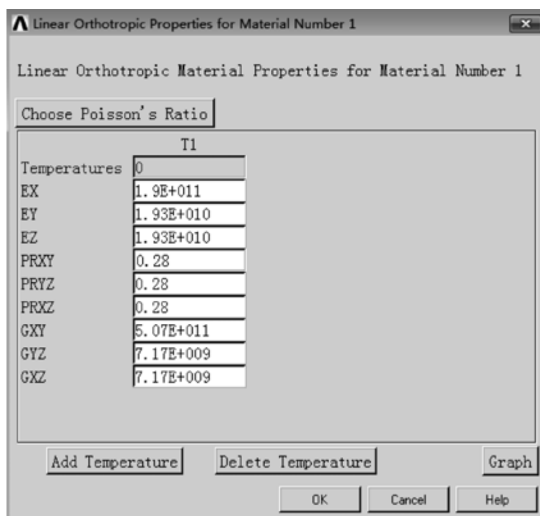


图 5-5 “正交各向异性材料参数”设置面板

4．定义失效参数

（1）定义复合材料失效参数

GUI：Main Menu→Preprocessor→Material Props→Failure Criteria→Add→Edit，在弹出的对话框中选择材料 1，单击“OK”按钮，弹出如图 5-6 所示的“定义材料失效准则”面板，按照图中输入拉伸、压缩和剪切失效应力。

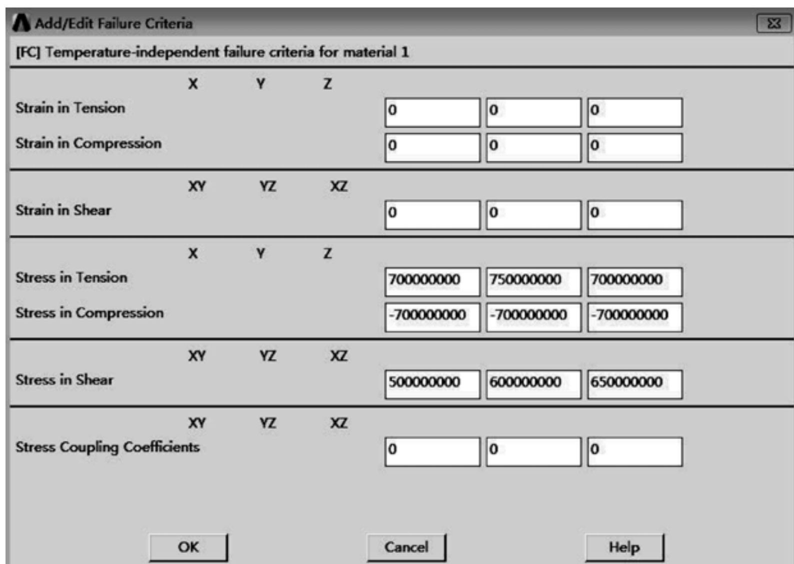


图 5-6 “定义材料失效准则”面板

（2）定义强化纤维的失效参数

GUI：Main Menu→Preprocessor→Material Props→Failure Criteria→Add→Edit，在弹出的对话框中选择材料 2，单击“OK”按钮，弹出如图 5-6 所示的“定义材料失效准则”面板，重

新输入失效参数：Stress in Tension X= 500E6，Stress in Tension Y=500E6，Stress in Tension Z=500E6，Stress in Compression X=−500E6，Stress in Compression Y=−500E6，Stress in Compression Z=−500E6，Stress in ShearXY= 400E6，Stress in ShearYZ= 500E6，Stress in ShearXZ= 550E6，单击“OK”按钮。



5．定义复合材料管道截面

GUI：Main Menu→Preprocessor→Sections→Shell→Lay-up→Add→Edit，弹出如图 5-7 所示的“复合材料管道截面”设置面板，单击 4 次“Add Layer”按钮，按照如图 5-7 所示输入数据，输入完毕后单击“OK”按钮。

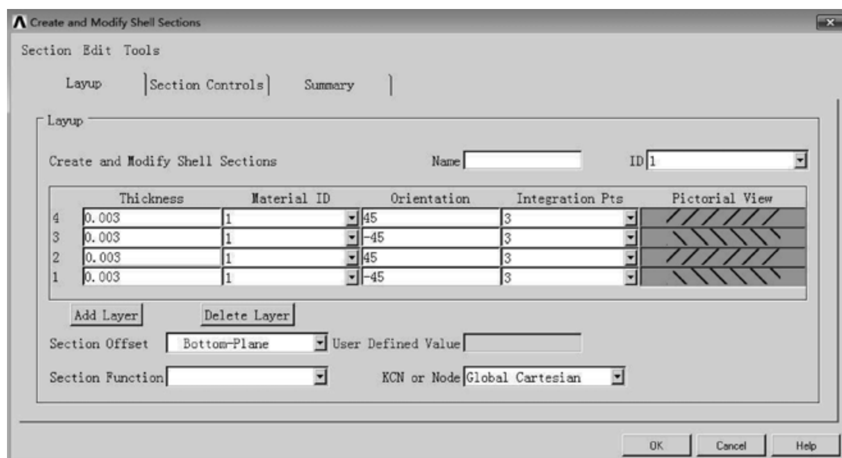


图 5-7 “复合材料管道截面”设置面板

6．定义强化纤维截面

GUI：Main Menu→Preprocessor→Sections→Reinforcing→Add→Edit，弹出如图 5-8 所示的“强化纤维截面”设置面板，按照图 5-8 所示进行设置，设置完毕后单击“OK”按钮。

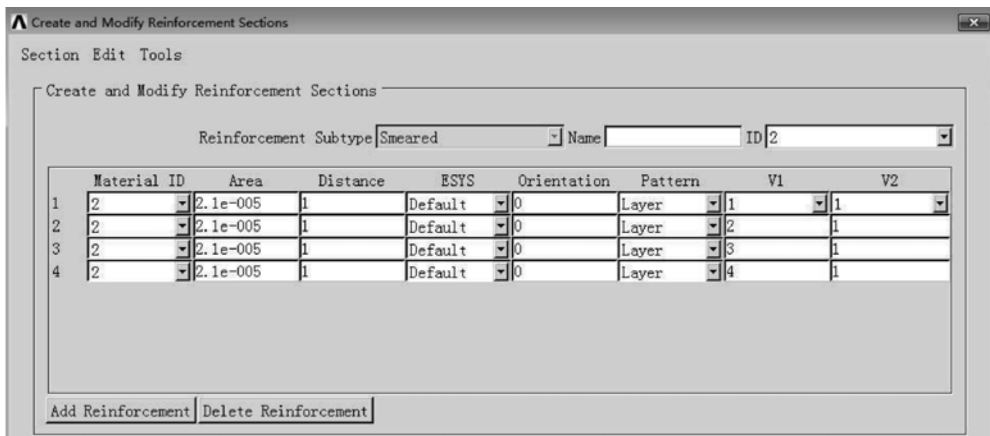


图 5-8 “强化纤维截面”设置面板

7．建立模型

（1）建立圆柱体

GUI：Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Volumes→Cylinder→Solid

Cylinde，弹出如图 5-9 所示的“创建实体圆柱体的参数”输入面板，用户按照图 5-9 进行设置。

（2）删除体

GUI：Main Menu→Preprocessor→Modeling→Delete→Volumes Only，弹出“拾取”对话框，单击“Pick All”按钮。

（3）删除上下底面

GUI：Main Menu→Preprocessor→Modeling→Delete→Area and Below，弹出“拾取”对话框，用户鼠标拾取面 A1 和面 A2，单击“OK”按钮。

（4）创建局部坐标系

GUI：Utility Menu→WorkPlane→Local Coordinate Systems→Create Local CS→At Specified Loc，弹出“拾取”对话框，在对话框中输入“0,0,0”，单击“OK”按钮，弹出如图 5-10 所示的“在指定位置创建局部坐标系”设置面板，“Type of coordinate system”选择“Cylindrical 1”，单击“OK”按钮。

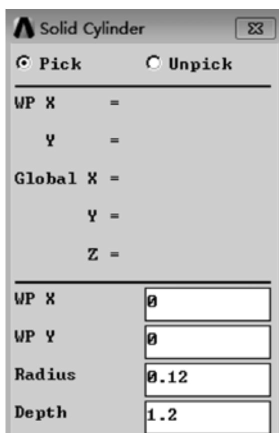


图 5-9 “创建实体圆柱体的参数”输入面板

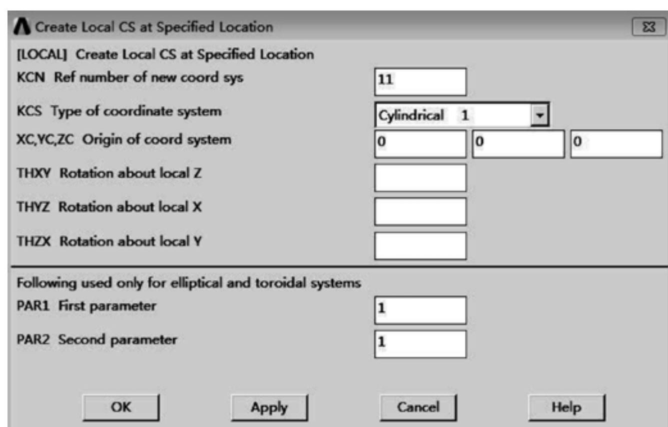


图 5-10 “在指定位置创建局部坐标系”设置面板

8．划分网格

（1）打开网格划分工具

GUI：Main Menu→Preprocessor→Meshing→MeshTool。

（2）设置网格属性

单击“网格划分工具”面板上“Element Attributes”区域的“Set”按钮，弹出如图 5-11 所示的“网格属性”设置面板，按照图 5-11 进行设置，单击“OK”按钮。

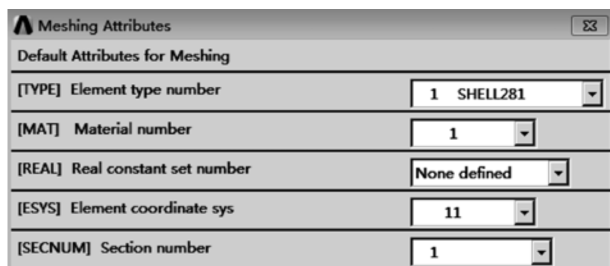


图 5-11 “网格属性”设置面板

（3）设置网格总体尺寸

选择如图 5-12 所示的“网格划分工具”面板中“尺寸控制”子面板中的“Global”选项并单击“Set”按钮，弹出如图 5-13 所示的“总体网格尺寸”设置面板。

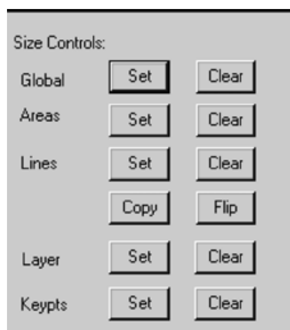


图 5-12 “网格划分工具”面板中“尺寸控制”子面板

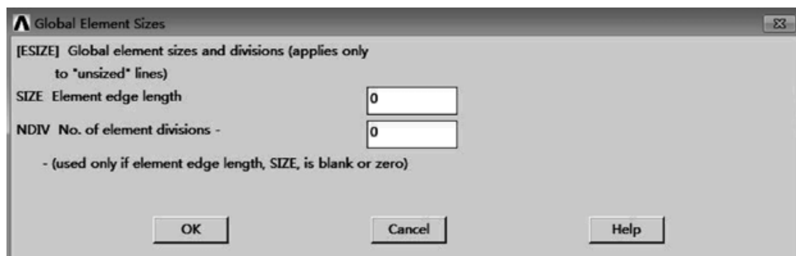


图 5-13 “总体网格尺寸设置”面板

该设置面板中存在两个控制选项，“Element edge length”和“No. of element divisions”，在“Element edge length”设为“0.02”，单击“OK”按钮。

（4）划分管道网格

单击“网格划分工具”面板上“Mesh”按钮，弹出“拾取”对话框，单击“Pick All”按钮。

9．创建强化纤维

（1）设置单元属性

GUI：Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Elements→Elem Attributes，弹出如图 5-14 所示的“单元属性”设置面板，按照图 5-14 进行设置，单击“OK”按钮。

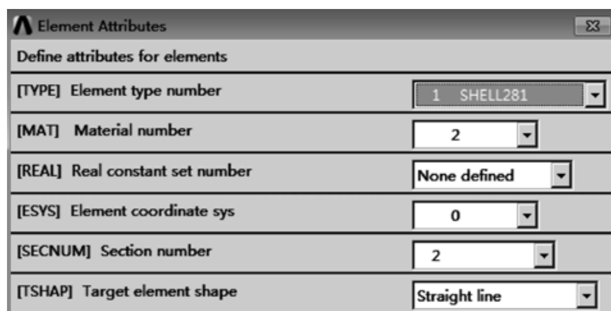


图 5-14 “单元属性”设置面板

（2）创建强化纤维

目前，ANSYS 现在还不支持 GUI 创建强化纤维，因此需要输入下列命令。

```
Ereinf
```

5.6.2 求解

1．设置分析类型

（1）激活静力学分析

GUI：Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis，弹出如图 5-15 所示的“分析类型”设置面板，选择“Static”，单击“OK”按钮。

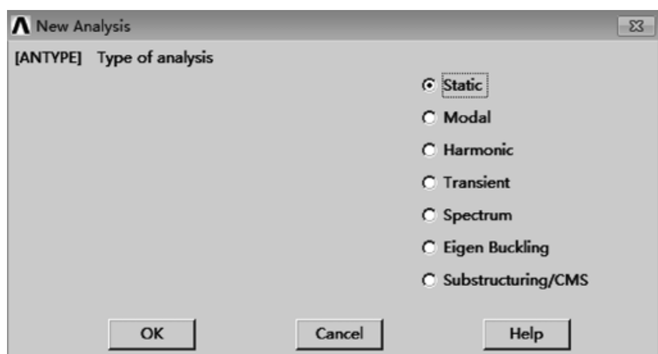


图 5-15 “分析类型”设置面板

（2）设置分析选项

GUI：Main Menu→Preprocessor→Loads→Analysis Type→Analysis Options，弹出如图 5-16 所示的“静态分析选项”设置面板，勾选“Large deform effects”复选框，激活大变形分析，其他设置保存默认设置，单击“OK”按钮。

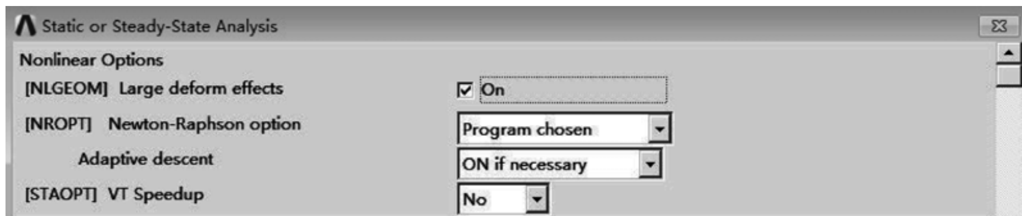


图 5-16 “静态分析选项”设置面板

2．定义边界条件

（1）选择底端节点

GUI：Utility Menu→Select→Entities，弹出如图 5-17 所示的“选取实体”设置面板，设置选取实体类型为“Nodes”，选取方式为“By Location”，输入 Z 的最小坐标值为“0”，单击“OK”按钮。

（2）约束底端的平动自由度

GUI：Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On

Nodes，弹出“拾取”对话框，单击“Pick All”按钮，弹出如图 5-18 所示的“在节点处施加位移约束”的设置面板，选择约束类型为“UX”“UY”和“UZ”，单击“OK”按钮。



图 5-17 “选取实体”设置面板

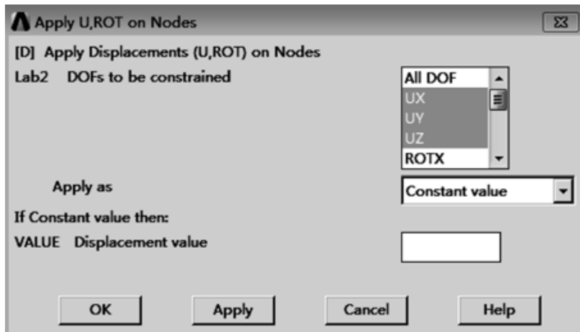


图 5-18 “在节点处施加位移约束”的设置面板

（3）选择所有实体

GUI：Utility Menu→Select→Everything。

（4）选择顶端节点

GUI：Utility Menu→Select→Entities，弹出如图 5-17 所示的“选取实体”设置面板，设置选取实体类型为“Nodes”，选取方式为“By Location”，输入 Z 的最小坐标值为“1.2”，单击“OK”按钮。

（5）约束底端的平动自由度

GUI：Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Nodes，弹出“拾取”对话框，单击“Pick All”按钮，弹出如图 5-18 所示的“在节点处施加位移约束”的设置面板，选择约束类型为“UX”“UY”和“UZ”，单击“OK”按钮。

（6）选择所有实体

GUI：Utility Menu→Select→Everything。

3．定义载荷

GUI：Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Pressure→On Areas，弹出“拾取”对话框，拾取面 A3 和 A4，单击“OK”按钮，弹出如图 5-19 所示的“在面上施加压力载荷”设置面板，输入“Load PRES value”为“20E6”，单击“OK”按钮。

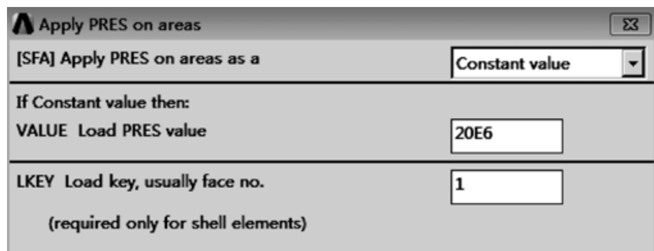


图 5-19 “在面上施加压力载荷”设置面板

4．求解

GUI：Main Menu→Solution→Solve→Current LS，在弹出的“求解状态”对话框中单击“OK”按钮，开始求解。

5.6.3 后处理

图 5-20～图 5-27 分别给出了复合材料管道和强化纤维的平动位移、等效应力、最大应力失效准则云图，具体查看方法，用户参见本章教学视频。

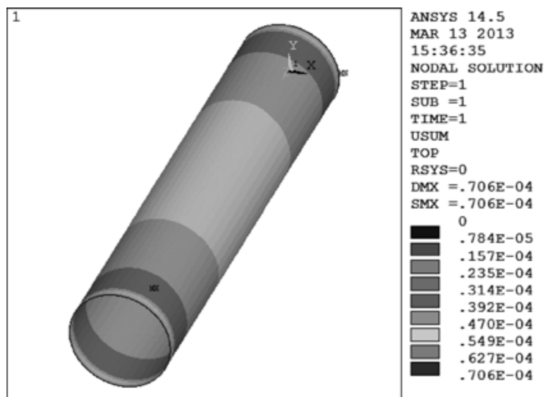


图 5-20　复合材料管道的平动位移云图

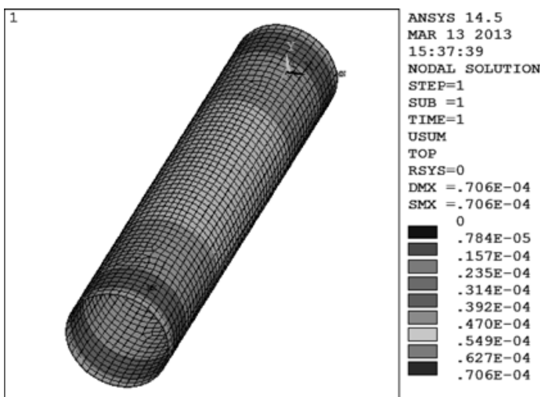


图 5-21　复合材料中强化纤维的平动位移云图

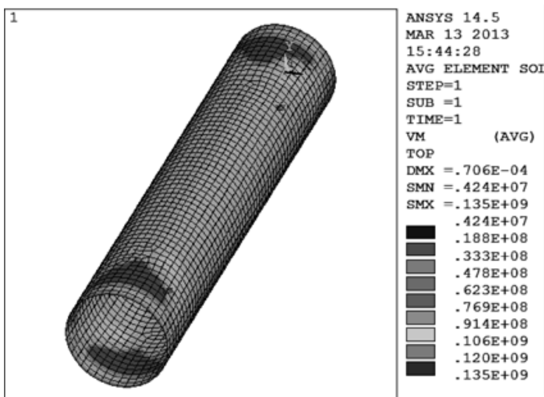


图 5-22　复合材料中强化纤维的等效应力云图

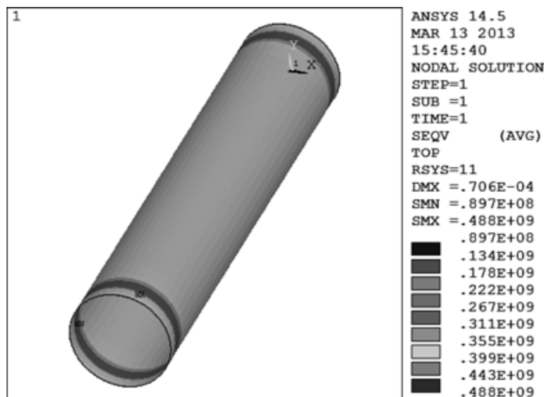


图 5-23　复合材料中管道的等效应力云图

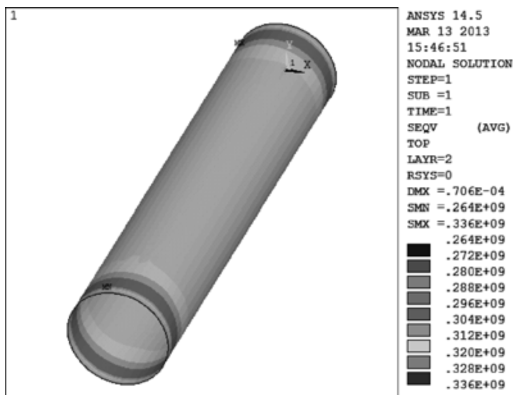


图 5-24　复合材料中第一层的等效应力云图

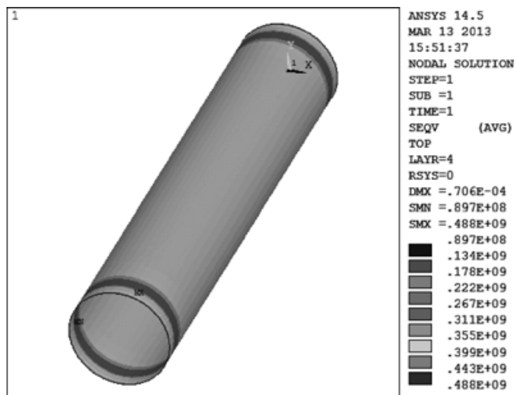


图 5-25　复合材料中第二层的等效应力云图

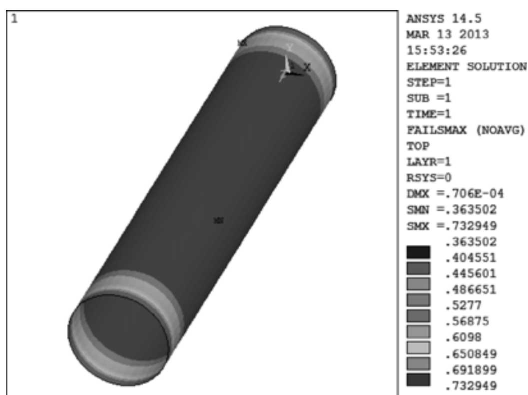


图 5-26 复合材料管道的最大应力失效准则云图

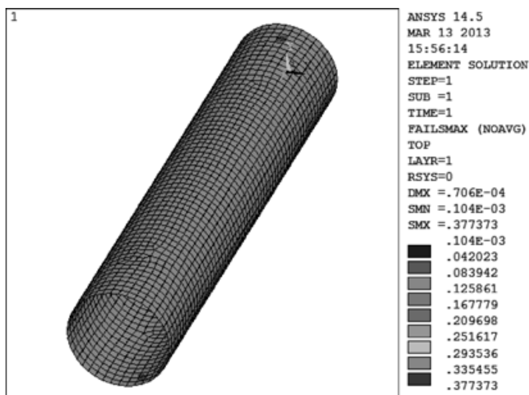


图 5-27 强化纤维的最大应力失效准则云图

5.7 命令流

```
/FILNAME,Pipeline failure analysis,0
/PREP7
ET,1,SHELL281     !定义复合材料单元
!设置复合材料单元关键字
KEYOPT,1,1,0
KEYOPT,1,8,2
KEYOPT,1,9,0
!定义复合材料参数
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,1,,190E9
MPDATA,EY,1,,19.3E9
MPDATA,EZ,1,,19.3E9
MPDATA,PRXY,1,,0.28
MPDATA,PRYZ,1,,0.28
MPDATA,PRXZ,1,,0.28
MPDATA,GXY,1,,507E9
MPDATA,GYZ,1,,7.17E9
MPDATA,GXZ,1,,7.17E9
!定义强化纤维材料参数
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,2,,2.1E11
MPDATA,PRXY,2,,0.3
!为复合材料定义失效参数
FC,1,S,XTEN,700E6
FC,1,S,YTEN,750E6
FC,1,S,ZTEN,700E6
FC,1,S,XCMP,-700E6
```

```
FC,1,S,YCMP,-700E6
FC,1,S,ZCMP,-700E6
FC,1,S,XY,500E6
FC,1,S,YZ,600E6
FC,1,S,XZ,650E6
!为强化纤维定义失效参数
FC,2,S,XTEN,500E6
FC,2,S,YTEN,500E6
FC,2,S,ZTEN,500E6
FC,2,S,XCMP,-500E6
FC,2,S,YCMP,-500E6
FC,2,S,ZCMP,-500E6
FC,2,S,XY,400E6
FC,2,S,YZ,500E6
FC,2,S,XZ,550E6
!定义复合材料截面参数
sect,1,shell,,
secdata, 0.003,1,-45,3
secdata, 0.003,1,45,3
secdata, 0.003,1,-45,3
secdata, 0.003,1,45,3
secoffset,BOT
seccontrol,,,, , , ,
!定义强化纤维截面参数
sect,2,reinf,smear,
secdata, 2,2.1E-5,1,0, 0.0,LAYn,1,1
secdata, 2,2.1E-5,1,0, 0.0,LAYn,2,1
secdata, 2,2.1E-5,1,0, 0.0,LAYn,3,1
secdata, 2,2.1E-5,1,0, 0.0,LAYn,4,1
!建立模型
CYL4,0,0,0.12, , , ,1.2
VDELE,          1
ADELE,          2, , ,1
ADELE,          1, , ,1
!创建局部坐标系
LOCAL,11,1,0,0,0, , , ,1,1,
!划分网格
ESIZE,0.02
ESYS,       11
AMESH,ALL
!创建强化纤维单元
secnum,2
MAT,2
ESYS,0
ereinf
!进入求解
```



```
/SOL
NLGEOM,1   !激活大变形分析
!定义位移边界条件
NSEL,ALL
NSEL,S,LOC,Z,0
NPLOT
D,ALL, , , , , ,UX,UY,UZ, , ,
ALLSEL,ALL
NSEL,ALL
NSEL,S,LOC,Z,1.2
NPLOT
D,ALL, , , , , ,UX,UY,UZ, , ,
ALLSEL,ALL
!定义管道的压力载荷
SFA,3,1,PRES,20E6
SFA,4,1,PRES,20E6
!开始求解
SOLVE
```

第 6 例　埋深管道与土的相互瞬态接触分析

6.1　实例覆盖的知识点

读者通过学习该实例可以掌握如下 ANSYS 的知识点。

1）瞬态动力学分析的基本步骤。

2）激活 D-P 土体本构模型方法。

3）定义正弦载荷的方法。

4）使用接触向导创建接触对的方法。

5）考虑模型重力的方法。

6）查看接触压力的方法。

6.2　模型

图 6-1 给出了管道与土相互作用分析模型，图中给出了模型的几何尺寸，单位为 m。

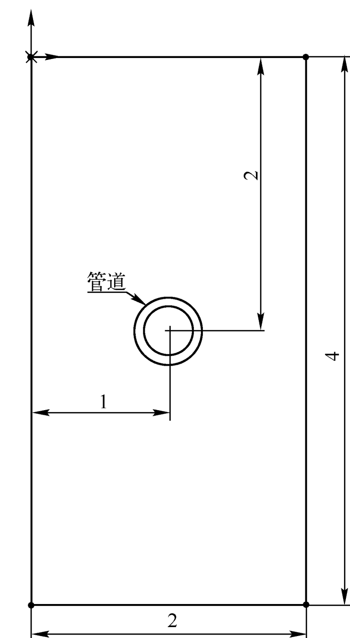


图 6-1　管道与土相互接触分析模型

6.3　单元

本实例选用平面单元 PLANE42，这个单元能够很好地模拟土体材料，对于使用 D-P 模型的材料具有很好的计算收敛性，管道与土之间的接触对使用接触向导创建。



6.4　材料参数

管道为钢材，弹性模量为 2.11E11Pa，泊松比为 0.3，密度为 7800kg/m^3，土体使用 D-P 模型，其中弹性模量为 2E8Pa，泊松比为 0.3，密度为 1800kg/m^3，内聚力为 2E4Pa，内摩擦角为 15°，管道与土之间的摩擦系数为 0.12。

6.5　边界条件和载荷

约束模型底面的 Y 方向位移，两边侧面 X 方向位移，整个模型考虑重力的影响，并且在模型的顶面施加一个正弦压力，其表达式如式（6-1）所示。

施加的压力与时间的关系曲线如图 6-2 所示。同时，管道内部承受 0.1MPa 压力。

$$P = 1E6\left|\sin(360 \times t)\right| \qquad (6\text{-}1)$$

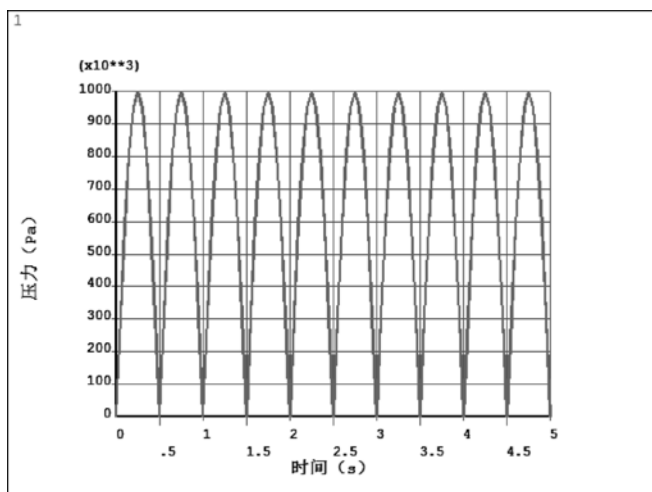


图 6-2　施加的压力与时间关系曲线

6.6　GUI 操作

6.6.1　前处理

1．定义文件名

GUI：Utility Menu→File→Change Jobname，弹出一个对话框，在输入栏中输入“Pipe

and soil contact”，单击“OK”按钮。

2．定义参数

在命令输入窗口中输入以下参数：模型的宽度 W=2，模型的高度 H=4，管道中心距左侧的距离 $W1$=1，管道中心距顶面的距离 $H1$=2，管道的内半径 $R1$=0.18，管道的外半径 $R2$=0.2。

3．选择单元

（1）定义单元

GUI：Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add→Edit→Delete，单击“Add”按钮，弹出如图 6-3 所示的“单元类型”对话框，在对话框的下方，输入“42”表示选择 PLANE42 单元，因为这个单元对于 D-P 模型计算具有很好的收敛性，单击“OK”按钮。

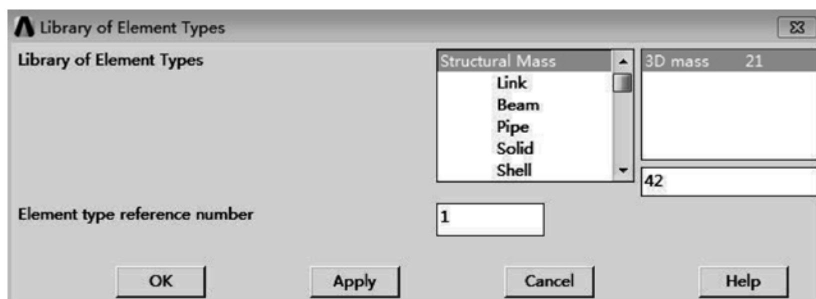


图 6-3 “单元类型”对话框

（2）设置单元关键字

在“单元类型”对话框中选择“PLANE42”，然后选择“Options”选项，弹出如图 6-4 所示的“PLANE42 单元关键字”设置面板，设置“Element behavior”为“Plane strain”，单击“OK”按钮，然后单击“Close”按钮关闭对话框。

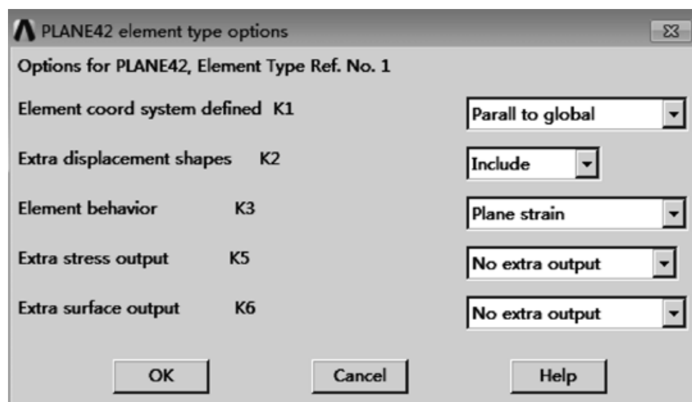


图 6-4 “PLANE42 单元关键字”设置面板

4．定义材料模型

（1）定义管道材料参数

GUI：Main Menu→Preprocessor→Material Props→Material Models，弹出一个对话框，单

击 Structural→Liner→Elastic→Isotropic，弹出如图 6-5 所示的“线弹性各向同性材料属性参数”设置面板，输入 EX 为“2.11E11”，PRXY 为“0.3”，单击“OK”按钮。

设置材料的密度，单击 Structural→Density，弹出如图 6-6 所示的“材料密度”设置面板，输入 DENS 为“7800”，单击“OK”按钮。



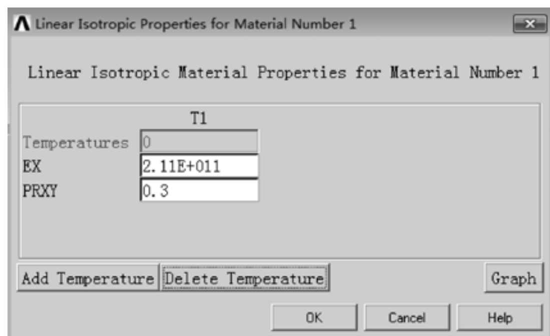


图 6-5 “线弹性各向同性材料属性参数”设置面板

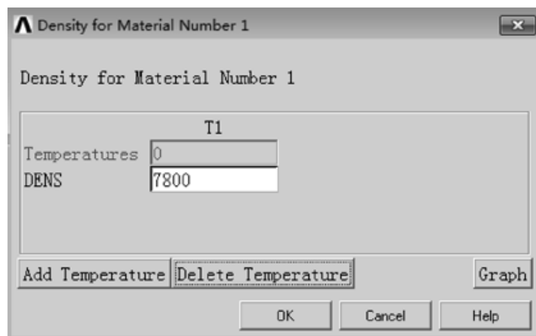


图 6-6 “材料密度”设置面板

（2）定义土体材料模型

选择 Material→New Model，单击“OK”按钮。GUI：Main Menu→Preprocessor→Material Props→Material Models，弹出一个对话框，单击 Structural→Liner→Elastic→Isotropic，弹出如图 6-5 所示的“线弹性各向同性材料属性参数”设置面板，输入 EX 为“2E8”，PRXY 为“0.3”，单击“OK”按钮。

设置材料的密度，单击 Structural→Density，弹出如图 6-6 所示的“材料密度”设置面板，输入 DENS 为“1500”，单击“OK”按钮。

设置材料的应力应变关系为 D-P 模型，单击 Structural→Nonlinear→Inelastic→Non-metal Plasticity→Drucker-Prager，弹出如图 6-7 所示的“D-P 模型材料”设置面板，输入 Cohesion 为“20000”，Fric Angle 为“15”，单击“OK”按钮。

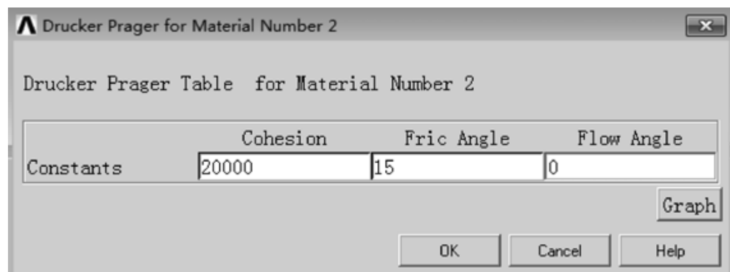


图 6-7 “D-P 模型材料”设置面板

5．建立模型

（1）定义矩形

GUI：Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Rectangle→By Dimensions，弹出如图 6-8 所示的“通过尺寸创建矩形”设置面板，输入 X1 为“0”，X2 为“W”，Y1 为“0”，Y2 为“H”，单击“OK”按钮。



图 6-8 “通过尺寸创建矩形”设置面板

（2）定义圆形

GUI：Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Circle→Solid Circle，弹出如图 6-9 所示的“实体圆形”创建面板，输入 WPX 为“W1”，WPY 为“H1”，Radius 为“R2”，单击“OK”按钮。

（3）进行布尔操作

GUI：Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Subtract→Areas，弹出“拾取”对话框，拾取面 A1，单击“Apply”按钮，继续拾取面 A2，单击“OK”按钮。

（4）定义圆环

GUI：Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Circle→Annulus，弹出如图 6-10 所示的“创建圆环”设置面板，输入 WPX 为“W1”，WPY 为“H1”，Rad-1 为“R1”，Rad-2 为“R2”，单击“OK”按钮。

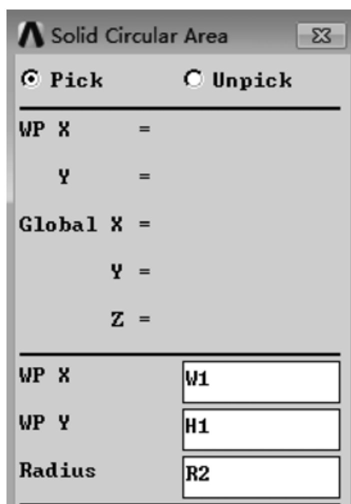


图 6-9 “实体圆形”创建面板

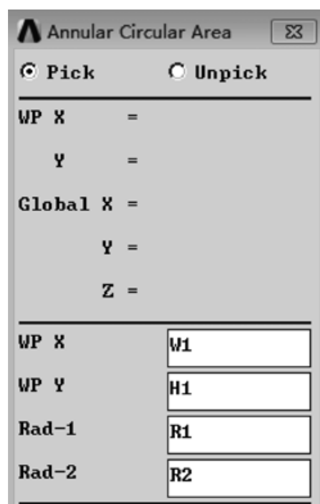


图 6-10 “创建圆环”设置面板

6．划分网格

（1）打开网格划分工具

GUI：Main Menu→Preprocessor→Meshing→MeshTool。

（2）设置线的网格划分份数

按照下列方式操作网格划分工具。

单击 Size Controls→Lines→Set，弹出“拾取”对话框，拾取线 L10、L6、L11、L7、L5、L9、L12、L8、L13、L14、L15、L16，单击“Apply”按钮，弹出如图 6-11 所示的“在拾取的线上设置单元尺寸”面板，“No. of element divisions”设为“20”，单击“Apply”按钮，继续拾取线 L1 和 L3，单击“Apply”按钮，弹出如图 6-11 所示的“在拾取的线上设置单元尺寸”面板，“No of element divisions”设为“15”，单击“Apply”按钮，继续拾取线 L2 和 L4，单击“Apply”按钮，弹出如图 6-11 所示的“在拾取的线上设置单元尺寸”面板，“No. of element divisions”设为“30”，单击“OK”按钮。

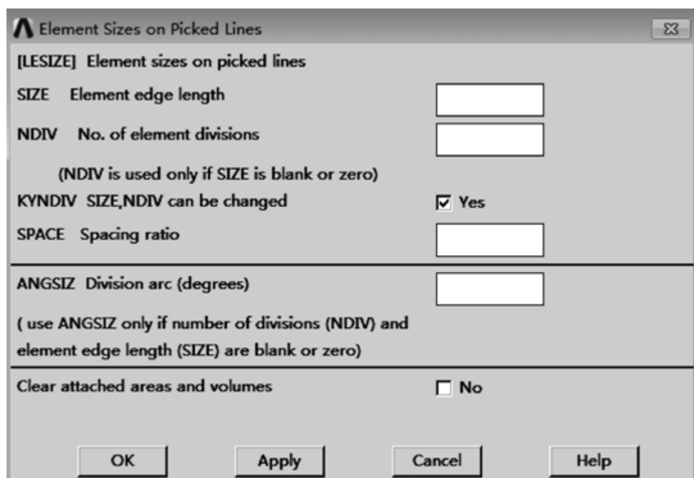


图 6-11 “在拾取的线上设置单元尺寸”面板

（3）划分管道网格

单击“网格划分工具”面板上“Mesh”按钮，弹出“拾取”对话框，拾取面 A1，单击“OK”按钮。

（4）设置网格属性

单击“网格划分工具”面板上 Element Attributes→Set，弹出如图 6-12 所示的“网格属性”设置面板，“Material number”设为“2”，单击“OK”按钮。

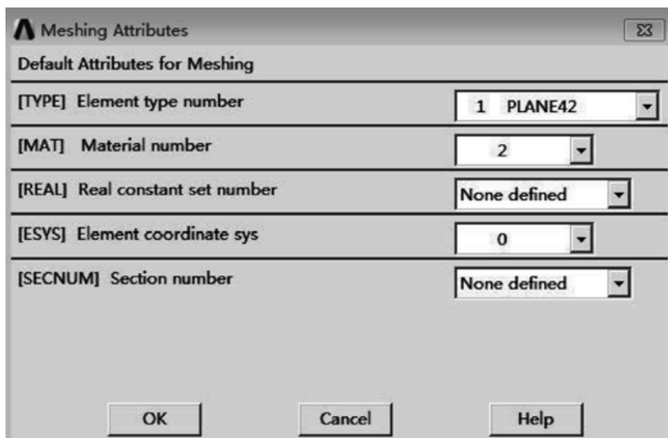


图 6-12 “网格属性”设置面板

（5）划分管道网格

单击“网格划分工具”面板上的“Mesh”按钮，弹出“拾取”对话框，拾取面 A2，单击“OK”按钮。

7．创建轮-轨系统的接触对

（1）打开接触管理器

单击主菜单中的图标，打开如图 6-13 所示的“接触管理器”面板。

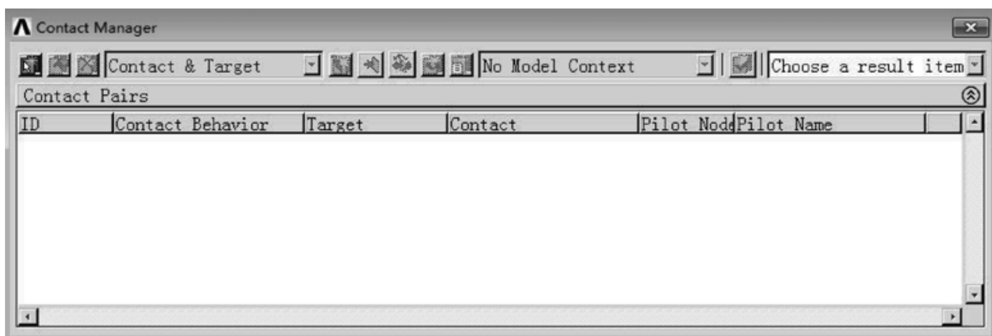


图 6-13 “接触管理器”面板

（2）定义管道-土之间的接触对

单击接触管理器中的，弹出如图 6-14 所示的“目标面及目标单元类型”设置面板，在该面板中“Target Surface”选择“Lines”，“Target Type”选择“Flexible”，单击“Pick Target”按钮，弹出“拾取”对话框，拾取线 L5、L6、L7、L8，单击“Apply”按钮，然后单击图 6-14 所示的“Next”按钮，弹出图 6-15 所示的“接触面及接触单元类型”设置面板，在该面板中“Contact Surface”选择“Lines”，“Contact Element Type”选择“Surface-to-Surface”，单击“Pick Contact”按钮，拾取面 L9、L10、L11、L12，单击“Apply”按钮，单击图 6-15 中的“Next”按钮，弹出图 6-16 所示的“创建接触对”面板，单击“Optional settings”，弹出如图 6-17 所示的“接触对摩擦属性”设置面板，输入摩擦系数为“0.12”，返回如图 6-16 所示“创建接触对”面板，单击“Creat”按钮来创建接触对。

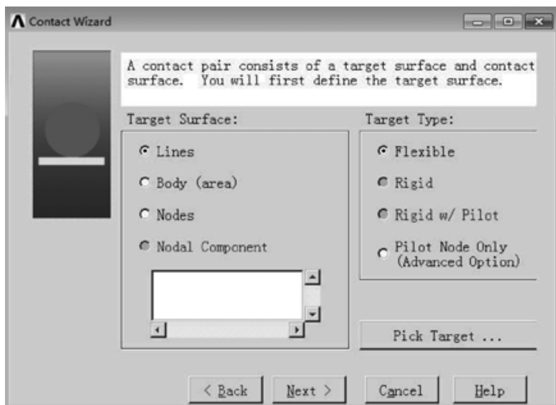


图 6-14 “目标面及目标单元类型”设置面板

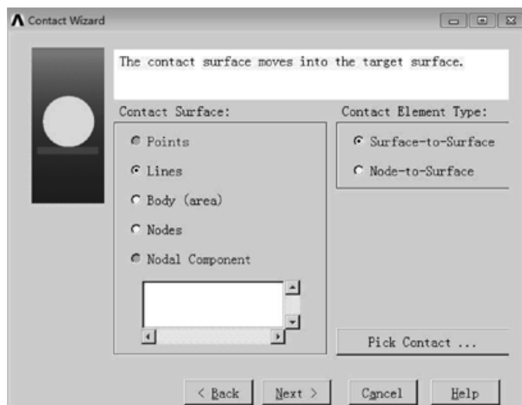


图 6-15 “接触面及接触单元类型”设置面板

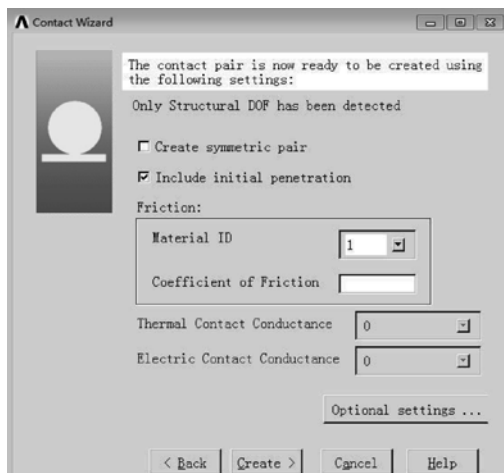


图 6-16 “创建接触对”面板

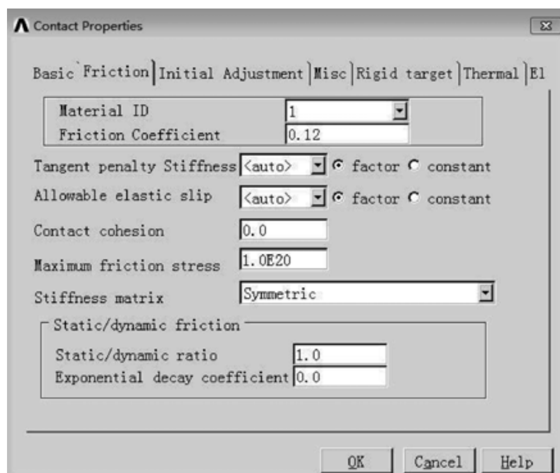


图 6-17 “接触对摩擦属性”设置面板

6.6.2 求解

1．设置分析类型

（1）激活瞬态分析

GUI：Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis，弹出如图 6-18 所示的“分析类型”设置面板，选择“Transient”，单击“OK”按钮。

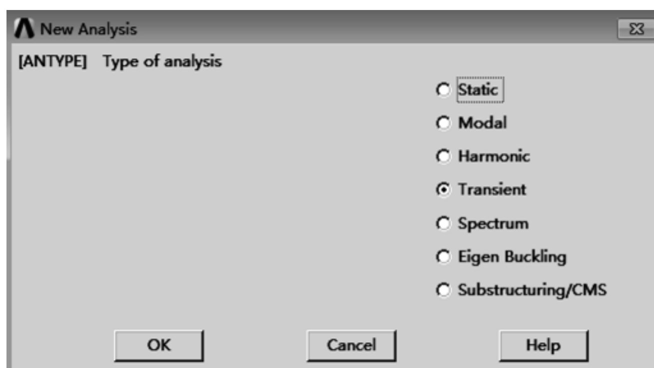


图 6-18 “分析类型”设置面板

（2）设置分析选项

GUI：Main Menu→Preprocessor→Loads→Analysis Type→Analysis Options，弹出如图 6-19 所示的“瞬态分析选项”设置面板，勾选“Large deform effects”复选框，激活大变形分析，其他设置保存默认设置，单击“OK”按钮。

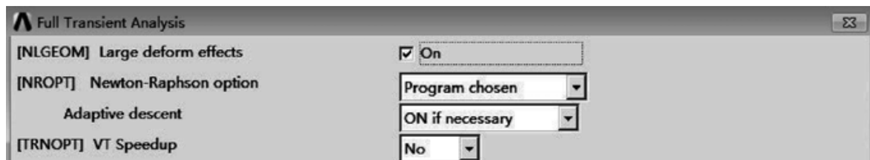


图 6-19 “瞬态分析选项”设置面板

2．定义边界条件

GUI：Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Lines，弹出“拾取”对话框，拾取线 L1 和 L2，单击“Apply”按钮，弹出如图 6-20 所示的“在线上施加约束”设置面板，设置约束类型为“UX”，单击“Apply”按钮，继续拾取线 L1，单击“Apply”按钮，弹出如图 6-20 所示的“在线上施加约束”设置面板，设置约束类型为“UY”，单击“OK”按钮。

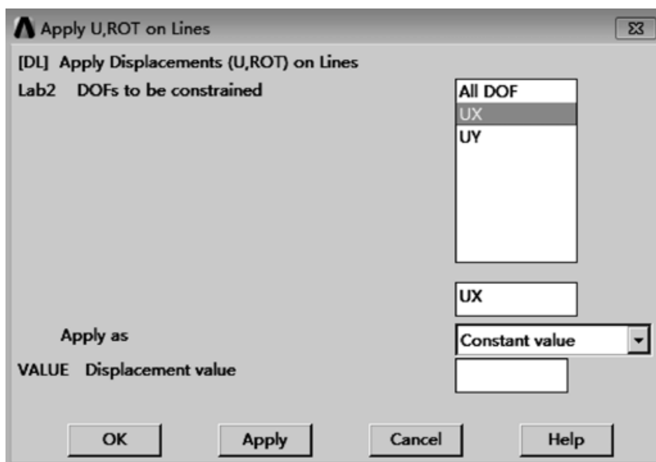


图 6-20 “在线上施加约束”设置面板

3．定义管道内部压力

GUI：Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Pressure→On Lines，弹出“拾取”对话框，拾取线 L13、L14、L15、L16，单击“OK”按钮，弹出如图 6-21 所示的“在线上施加压力”设置面板，输入压力值为“0.1E6”，单击“OK”按钮。

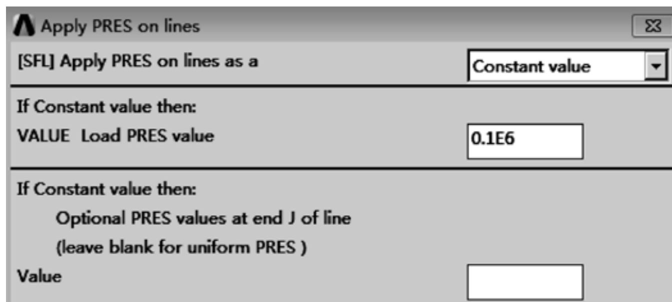


图 6-21 “在线上施加压力”设置面板

4．定义模型顶部压力

（1）定义函数

GUI：Utility Menu→Parameters→Functions→Define/Edit，弹出如图 6-22 所示的“函数编辑器”设置面板，在面板中的“Result”中输入“Qm*exp(-3*(({X}-0.18)^2+(0.15-V*{TIME}-{Z})^2)/R^2)”，并设置角度单位为“Degrees”。

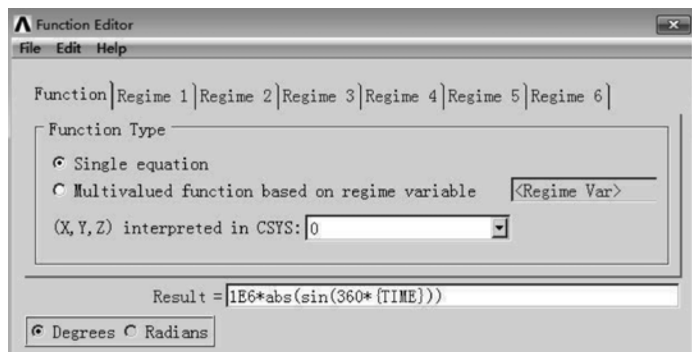


图 6-22 “函数编辑器“设置面板

（2）保存函数并命名函数名为 P

选择“Function Editor”上的 File→Save，输入保存文件名为 P，单击“保存”按钮。

（3）退出函数编辑器

选择“函数编辑器”面板的 File→Exit。

（4）读入函数

GUI：Solution→Define Loads→Apply→Functions→Read File，弹出“选择函数文件”对话框，选择“P.func”，单击“打开”按钮，弹出“Function Loader”对话框，在“Table parameter name”中输入“P”，单击“OK”按钮。

（5）施加表格压力

GUI：Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Pressure→On Lines，弹出“拾取”对话框，拾取线 L3，单击“OK”按钮，弹出如图 6-21 所示的“在线上施加压力”设置面板，选择加载方式为“Existing table”，单击“OK”按钮，在弹出的对话框中选择表格 P，单击“OK”按钮。

5．施加重力加速度

GUI：Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Inertia→Gravity→Global，弹出如图 6-23 所示的“施加重力加速度”设置面板，输入 Y 方向加速度为“9.8”，单击“OK”按钮。

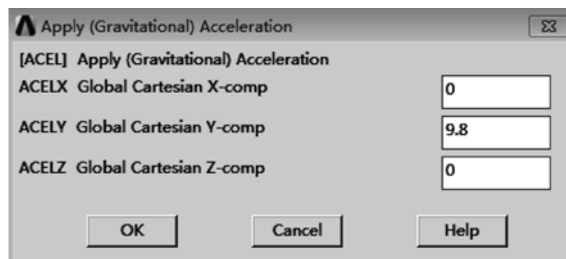


图 6-23 “施加重力加速度”设置面板

6．定义载荷步选项

（1）设置输出控制

GUI：Main Menu→Solution→Load Step Opts→Output Ctrls→DB/Results File，在弹出的计算结果输出控制面板，选择“Every substep”，单击“OK”按钮。

（2）设置计算时间和子步

GUI：Main Menu→Solution→Load Step Opts→Time→Frequenc→Time→Time Step，弹出如图 6-24 所示的“时间和子步选项”设置面板，“Time at end of load step”设为“5”，“Number of substeps”设为“100”，“Automatic time stepping”选择“ON”，“Maximum no. of substeps”设为“150”，“Minimum no. of substeps”设为“100”，其他保持默认设置，单击“OK”按钮。

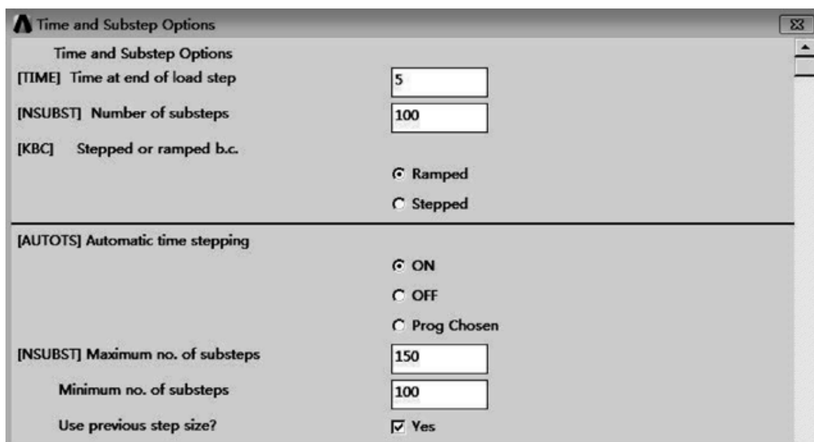


图 6-24 “时间和子步选项”设置面板

7．求解

GUI：Main Menu→Solution→Solve→Current LS，弹出“求解提示”对话框，单击“OK”按钮。

6.6.3 后处理

图 6-25～图 6-34 分别给出了管道与土相互作用不同时刻的等效应力与接触压力云图，图 6-35～图 6-38 分别给出了不同时刻的等效塑性应变云图，图 6-39～图 6-42 分别给出了不同节点位移、接触压力、等效应力和等效塑性应变随时间的变化关系，具体查看方法可以参考本章视频教程。

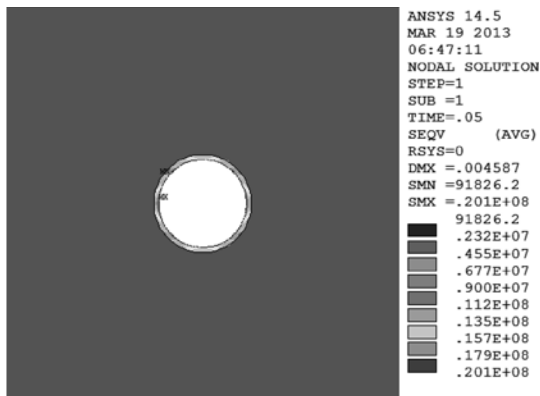


图 6-25 0.05s 时刻的等效应力云图

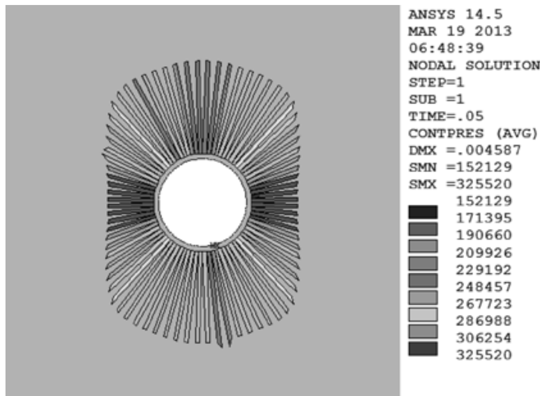


图 6-26 0.05s 时刻的管道与土接触压力云图

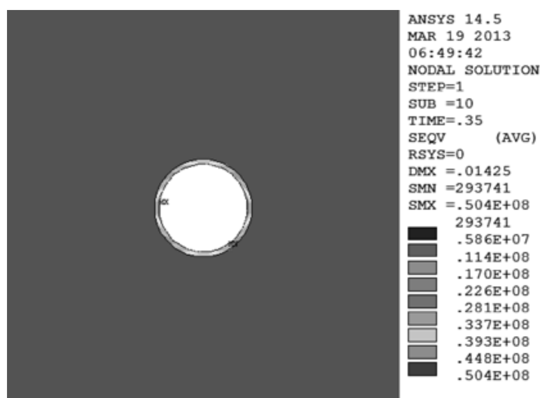


图 6-27　0.35s 时刻的等效应力云图

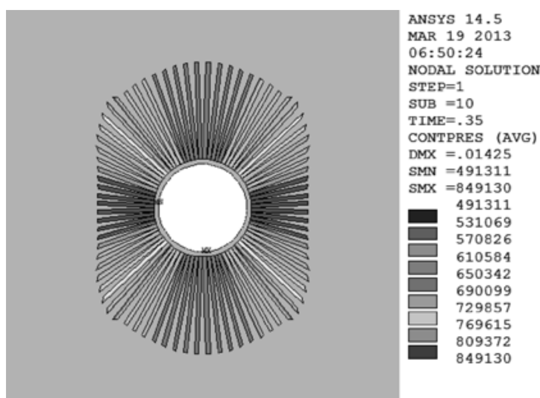


图 6-28　0.35s 时刻的管道与土接触压力云图

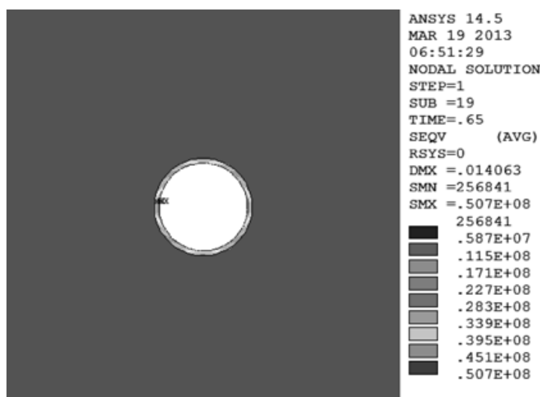


图 6-29　0.65s 时刻的等效应力云图

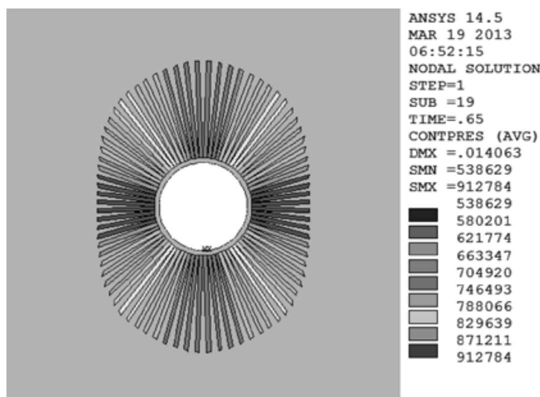


图 6-30　0.65s 时刻的管道与土接触压力云图

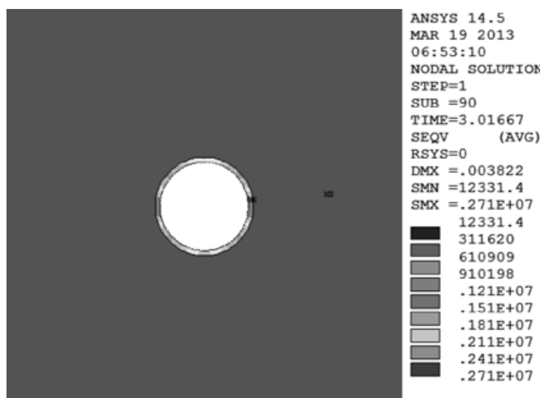


图 6-31　3.10667s 时刻的等效应力云图

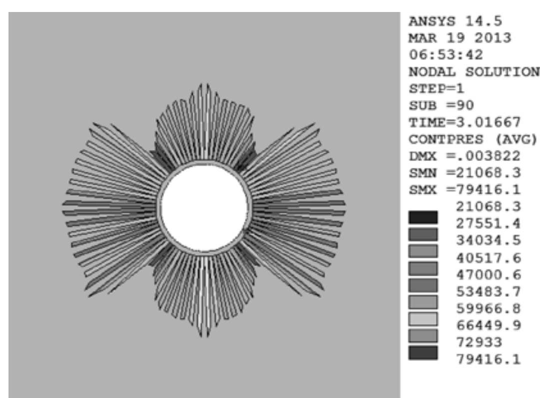


图 6-32　3.10667s 时刻的管道与土接触压力云图

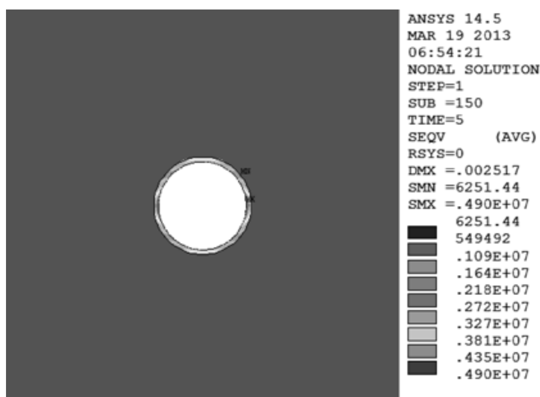


图 6-33　5s 时刻的等效应力云图

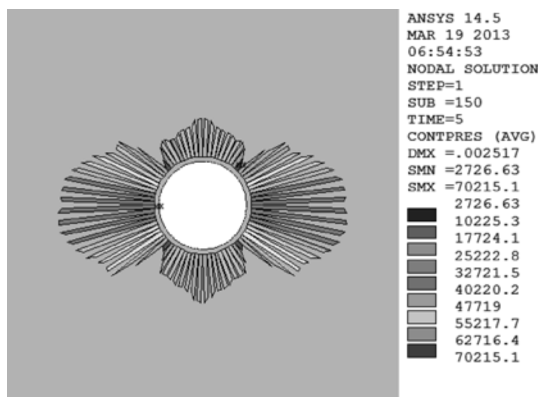


图 6-34　5s 时刻的管道与土接触压力云图

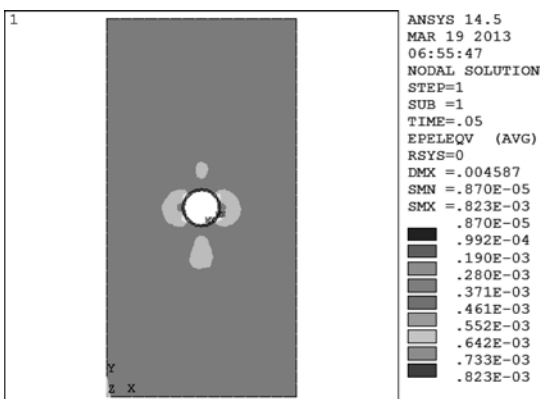


图 6-35　0.05s 时刻的土体等效塑性应变云图

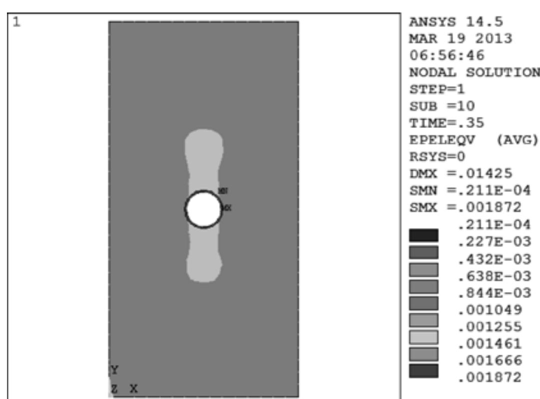


图 6-36　0.35s 时刻的土体等效塑性应变云图

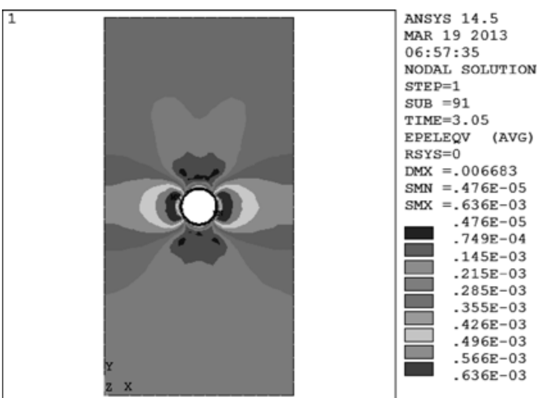


图 6-37　3.05s 时刻的土体等效塑性应变云图

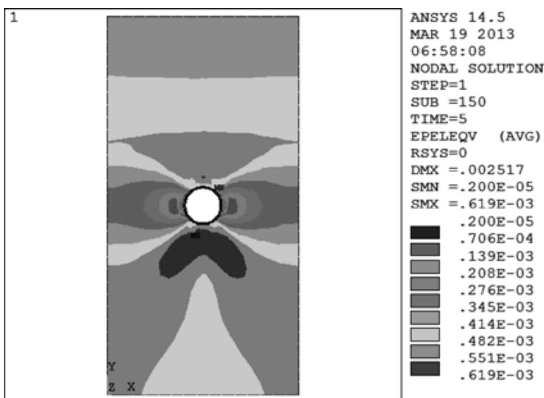


图 6-38　5s 时刻的土体等效塑性应变云图

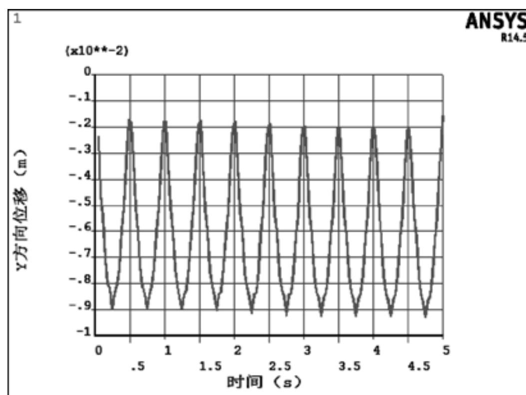


图 6-39　23 号节点处 Y 方向位移与时间的关系

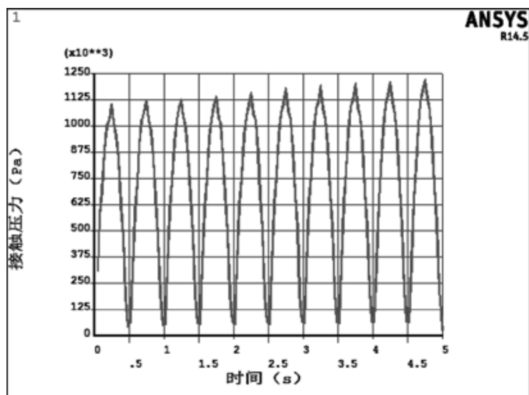


图 6-40　23 号节点处接触压力与时间的关系

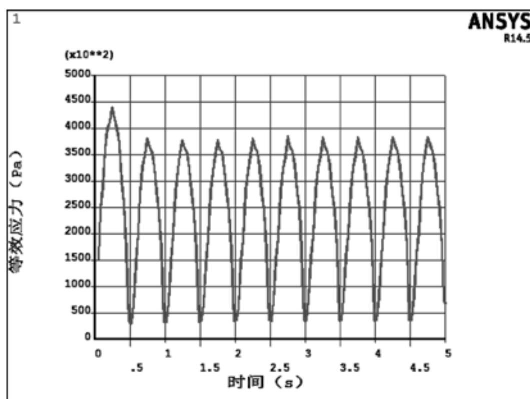


图 6-41　1373 节点处等效应力与时间的关系

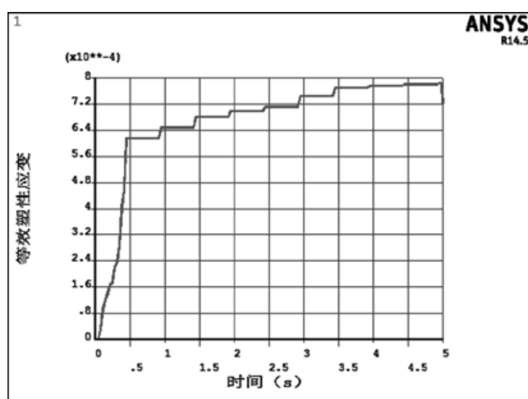


图 6-42　1373 节点处等效塑性应变与时间的关系

6.7　命令流

```
/FILNAME,Pipe and soil contact,0
!进入前处理
/PREP7
W=2 !模型的宽度
H=4    !模型的高度
W1=1 !管道中心距左侧的距离
H1=2 !管道中心距顶面的距离
R1=0.18 !管道的内半径
R2=0.2      !管道的外半径
!定义单元
ET,1,PLANE42
KEYOPT,1,3,2
!定义材料参数
MP,EX,1,2.11E11
MP,PRXY,1,0.3
```

```
MP,DENS,1,7800
MP,EX,2,2E8
MP,PRXY,2,0.3
MP,DENS,2,1500
TB,DP,2,,,
TBMODIF,1,1,2E4
TBMODIF,1,2,15
TBMODIF,1,3,
!建立模型
RECTNG,0,W,0,H,
CYL4,W1,H1,R2
ASBA,       1,       2
CYL4,W1,H1,R1, ,R2
!划分网格
LESIZE,10, , ,20, , , , ,1
LESIZE,6, , ,20, , , , ,1
LESIZE,11, , ,20, , , , ,1
LESIZE,7, , ,20, , , , ,1
LESIZE,5, , ,20, , , , ,1
LESIZE,9, , ,20, , , , ,1
LESIZE,12, , ,20, , , , ,1
LESIZE,8, , ,20, , , , ,1
LESIZE,13, , ,20, , , , ,1
LESIZE,14, , ,20, , , , ,1
LESIZE,15, , ,20, , , , ,1
LESIZE,16, , ,20, , , , ,1
LESIZE,1, , ,15, , , , ,1
LESIZE,3, , ,15, , , , ,1
LESIZE,2, , ,30, , , , ,1
LESIZE,4, , ,30, , , , ,1
!划分网格
MAT,1
AMESH,1
MAT,2
AMESH,3
!定义接触对
!具体操作用户可以参见本章的视频教程
!进入前处理
/SOL
ANTYPE,4 !激活瞬态分析
NLGEOM,1 !激活大变形
!定义边界条件
DL,1, ,UY,
DL,2, ,UX,
DL,4, ,UX,
!定义载荷
```



```
SFL,13,PRES,0.1E6,
SFL,14,PRES,0.1E6,
SFL,15,PRES,0.1E6,
SFL,16,PRES,0.1E6,
!定义函数
*DEL,_FNCNAME
*DEL,_FNCMTID
*DEL,_FNCCSYS
*SET,_FNCNAME,'P'
*SET,_FNCCSYS,0
! /INPUT,P.func,,,1
*DIM,%_FNCNAME%,TABLE,6,7,1,,,,%_FNCCSYS%
!
! Begin of equation: 1E6*abs(sin(360*{TIME}))
*SET,%_FNCNAME%(0,0,1), 0.0, -999
*SET,%_FNCNAME%(2,0,1), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(3,0,1), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(4,0,1), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(5,0,1), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(6,0,1), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(0,1,1), 1.0, -1, 0, 360, 0, 0, 1
*SET,%_FNCNAME%(0,2,1), 0.0, -2, 0, 1, -1, 3, 1
*SET,%_FNCNAME%(0,3,1),      1, -1, 9, 1, -2, 0, 0
*SET,%_FNCNAME%(0,4,1), 0.0, -1, 15, 1, -1, 0, 0
*SET,%_FNCNAME%(0,5,1), 0.0, -2, 0, 1E6, 0, 0, -1
*SET,%_FNCNAME%(0,6,1), 0.0, -3, 0, 1, -2, 3, -1
*SET,%_FNCNAME%(0,7,1), 0.0, 99, 0, 1, -3, 0, 0
! End of equation: 1E6*abs(sin(360*{TIME}))
!-->
)/GOP        ! Resume printing after UNDO process
)! We suggest a save at this point
SFL,3,PRES, %P%
ACEL,0,9.8,0, !定义重力加速度
OUTRES,ALL,ALL, !设置输出控制
TIME,5    !设置计算时间
AUTOTS,1
NSUBST,100,150,100 ,1
KBC,0
SOLVE
```



第 7 例　功能梯度压电梁的有限元分析

7.1　实例覆盖的知识点

读者通过学习该实例可以掌握如下 ANSYS 的知识点。

1）压电分析的基本步骤。

2）建立功能梯度材料梯度梁的方法。

3）设置压电梁的极化方向。

4）网格划分控制方法。

5）实体选择工具的使用。

7.2　模型

图 7-1 给出了功能梯度压电梁力学模型，模型的长度为 0.7m，高度为 0.02m，材料参数按照指数变化。



图 7-1　功能梯度压电梁力学模型

7.3　单元

本实例选用多场耦合单元 PLANE223 模拟功能梯度材料的压电梁，将单元关键中的设置分析类型选项设置为 Electroelast/Piezoelectric。

7.4　材料参数

该功能梯度压电梁最底层的材料参数如下：弹性模量 E0=2.2E9Pa，泊松比 v=0.31，剪切模量 G0=0.77E9，压电应变系数为 d310=2.2E-11C/N，d320=0.8E-11C/N，d330=-3.0E-11C/N，常应力相对介电常数 EP110=12，EP220=12，该功能梯度材料按照指数规律变化如式（7-1）～式（7-7）所示，其中 β 为非均匀参数，计算取 10，为了模拟材料参数指数变化规

律，将功能梯度压电梁分 20 层。

$$E = E_0 e^{\beta y} \tag{7-1}$$

$$G = G_0 e^{\beta y} \tag{7-2}$$

$$D_{31} = D_{310} e^{\beta y} \tag{7-3}$$

$$D_{32} = D_{320} e^{\beta y} \tag{7-4}$$

$$D_{33} = D_{330} e^{\beta y} \tag{7-5}$$

$$EP_{11} = EP_{110} e^{\beta y} \tag{7-6}$$

$$EP_{22} = EP_{220} e^{\beta y} \tag{7-7}$$



7.5 边界条件和载荷

完全约束功能梯度压电梁左端面的位移，在模型的上表面施加 100V 电压，在模型的右端面中点施加竖直向下的集中力 F 为 20N。

7.6 GUI 操作

7.6.1 前处理

1．定义文件名

GUI：Utility Menu→File→Change Jobname，弹出一个对话框，在输入栏中输入“Piezoelectric beam”，单击“OK”按钮。

2．定义参数

在命令输入窗口中输入：H=0.02，L=0.7，E0=2.2E9，NU=0.31，G0=0.775E9 ,D310=2.2E-11，D320=0.8E-11，D330=-3.0e-11，EP110=12，EP220=12，BEITA=10，功能梯度材料涂层划分层数 N=20。

3．选择单元

（1）定义单元

GUI：Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add→Edit→Delete，单击“Add”按钮，弹出如图 7-2 所示的“单元类型选择”对话框，在弹出的对话框左边选择“Coupled Field”，在右边选择“Brick 20node 223”单元，单击“OK”按钮。

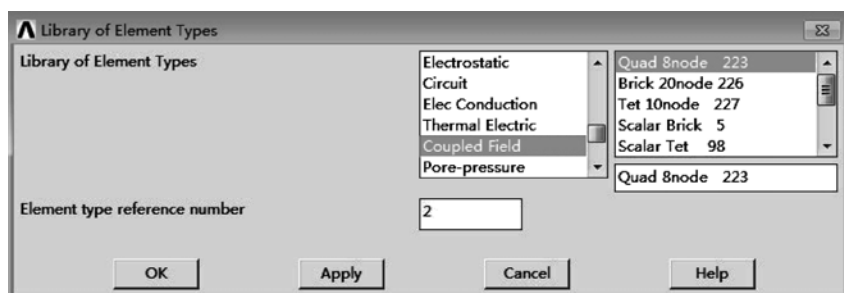


图 7-2 “单元类型”选择对话框

（2）设置单元关键字

在“单元类型”对话框中选择“PLANE223”，然后选择“Options”选项，弹出如图 7-3 所示的“PLANE226 单元关键字”设置面板，设置“Analysis Type”为“Electroelast/Piezoelectric”，单击“OK”按钮，然后单击“Close”按钮关闭对话框。

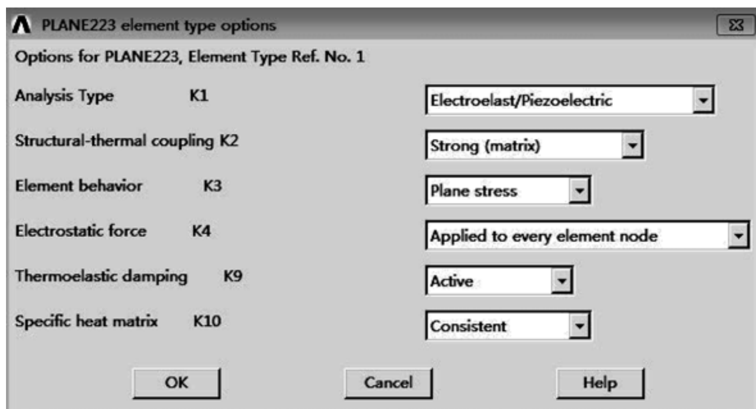


图 7-3 “PLANE223 单元关键字”设置面板

4．定义材料模型

对于功能梯度压电梁材料，使用分层方法模拟材料的物性参数连续变化的特点，本实例中将功能梯度材料涂层划分 20 层，为了提高分析效率，因此使用命令流方式定义材料模型，

```
*DO,I,1,N,1
tb,ANEL,I,,,1
tbda,1,1/E0*EXP(BEITA*(H/N*(I-1))),-NU/E0*EXP(BEITA*(H/N*(I-1))),-NU/E0
*EXP(BEITA*(H/N*(I-1)))
tbda,7,1/E0*EXP(BEITA*(H/N*(I-1))),-NU/E0*EXP(BEITA*(H/N*(I-1)))
tbda,12,1/E0*EXP(BEITA*(H/N*(I-1)))
tbda,16,1/G0*EXP(BEITA*(H/N*(I-1)))
tb,PIEZ,I,,,1                         ! 压电应变矩阵 Piezoelectric strain matrix
tbda,2,d310*EXP(BEITA*(H/N*(I-1)))
tbda,5,d330*EXP(BEITA*(H/N*(I-1)))
tbda,8,d320*EXP(BEITA*(H/N*(I-1)))
tb,DPER,I,,,1                         ! 常应力作用下的介电常数
tbdata,1,ep110*EXP(BEITA*(H/N*(I-1))),ep220*EXP(BEITA*(H/N*(I-1)))

*ENDDO
```

5．定义局部坐标系

通过局部坐标系来制定功能梯度压电梁的极化方向，用户可以使用下列方式创建局部坐标系。

GUI：Utility Menu→WorkPlane→Local Coordinate Systems→Create Local CS→At Specified Loc，弹出“拾取”对话框，用户单击模型的任意一点，弹出如图 7-4 所示的“在指定位置创建局部坐标系”面板，将“Origin of cooord system”修改为“0,0,0”，单击“OK”按钮。

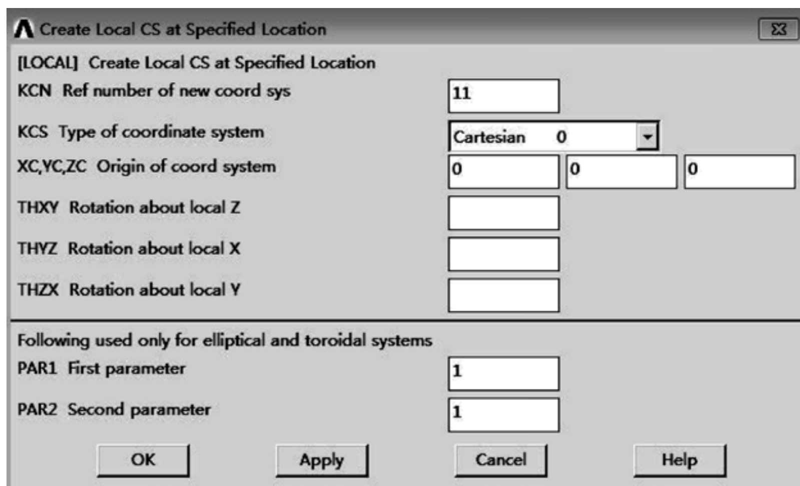


图 7-4 “在指定位置创建局部坐标系”面板

6．建立模型

（1）定义关键点

GUI：Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Keypoints→In Active CS，弹出图 7-5 所示的“定义关键点”面板，在“Keypoint number”中输入“1”，然后继续输入在激活坐标系对应的坐标 X=0、Y=0 和 Z=0，单击“Apply”按钮；继续输入关键点号为 2 和对应的坐标 X=L、Y=0 和 Z=0，单击“Apply”按钮；继续输入关键点号为“3”和对应的坐标 X=L、Y= H 和 Z=0，单击“Apply”按钮；继续输入关键点号为“4”和对应的坐标 X=0、Y=H 和 Z=0，单击“OK”按钮。

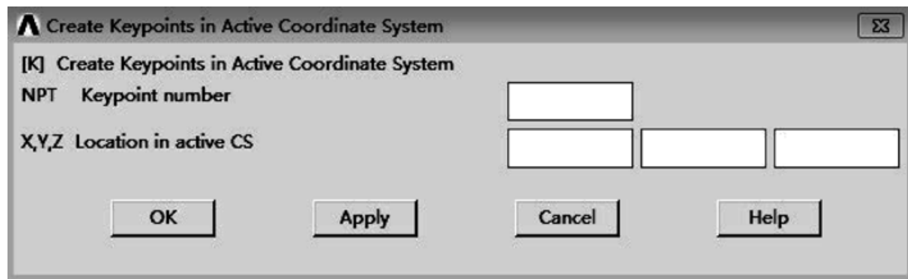


图 7-5 “定义关键点”面板

（2）定义面

GUI：Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Arbitrary→Through KPs，弹出“拾取”对话框，拾取关键点 1、2、3、4，单击“OK”按钮。

（3）使用工作平面分割面

1）移动工作平面

GUI：Utility Menu→WorkPlane→Offset WP by Increments，弹出图 7-6 所示的“偏移工作平面”设置面板，该面板主要包括工作平面的转动设置和平动设置，在转动设置面板中输入“0，-90，0”，输入完毕后单击“OK”按钮。



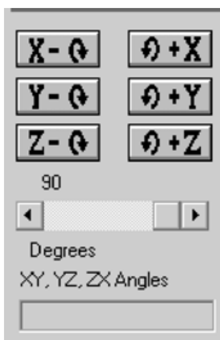


图 7-6 “偏移工作平面”设置面板

2）重复分割

对功能梯度材料涂层面需要进行多次分割，因此采用 APDL 的循环语句比较便捷，命令流如下。

```
*DO,I,1,N-1,1
wpoff,0,0,H/N
ASBW,ALL
*ENDDO
```

7．划分网格

（1）打开网格划分工具

GUI：Main Menu→Preprocessor→Meshing→MeshTool。

（2）设置网格属性

单击“网格划分工具”面板上的“Element Attributes”区域的“Set”按钮，弹出如图 7-7 所示的“网格属性”设置面板，设置“Element coordinate sys”为“11”，单击“OK”按钮。

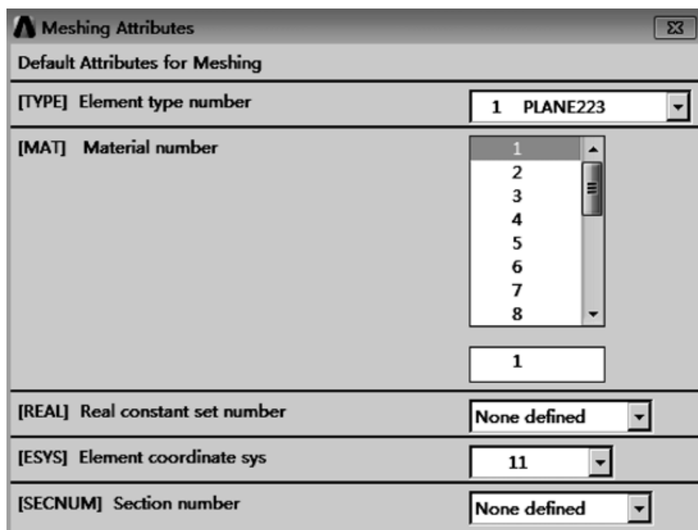


图 7-7 “网格属性”设置面板

（3）设置网格总体尺寸

选择如图 7-8 所示的“网格划分工具”面板“尺寸控制”子面板中的“Global”选项并单击“Set”按钮，弹出如图 7-9 所示的“总体网格尺寸”设置面板。



图 7-8 “网格划分工具”面板中“尺寸控制”子面板

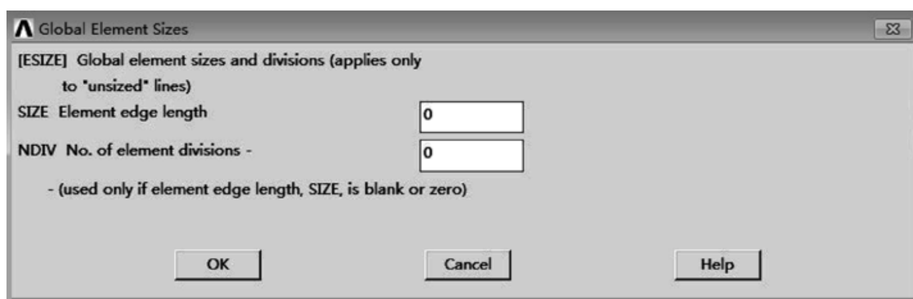


图 7-9 “总体网格尺寸”设置面板

该设置面板中存在两个控制选项，“Element edge length”和“No. of element divisions”，在单元尺寸中输入“H/20”，单击“OK”按钮。

（4）进行网格划分

因为模型中的需要划分的面较多，因此使用 APDL 语言中循环语句对于网格划分比较方便，命令流如下。

```
*DO,I,1,N,1
ASEL,S,LOC,Y,H/N*(I-1),H/N*I
MAT,I
AMESH,ALL
*ENDDO。
```

（5）选择所有实体

GUI：Utility Menu→Select→Everything。

7.6.2 求解

1．设置分析类型

GUI：Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis，弹出图 7-10 所示的“分析

类型”设置面板，选择“Static”选项，单击“OK”按钮。

2．定义结构位移边界条件

（1）选取功能梯度压电梁左侧节点

GUI：Utility Menu→Select→Entities，弹出如图 7-11 所示的“选取实体”设置面板，设置选取实体类型为“Nodes”，选取方式为“By Location”，输入 X 的最小坐标值为“0”，单击“OK”按钮。

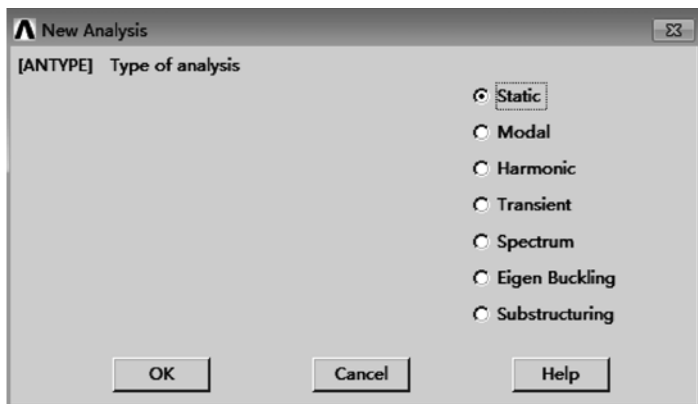


图 7-10 “分析类型”设置面板

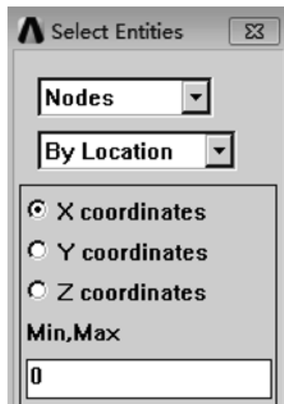


图 7-11 “选取实体”设置面板

（2）约束选取节点的位移

GUI：Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Nodes，弹出“拾取”对话框，单击“Pick All”按钮，弹出如图 7-12 所示的“在节点处施加约束”设置面板，选择约束类型为“UX”和“UY”，单击“OK”按钮。

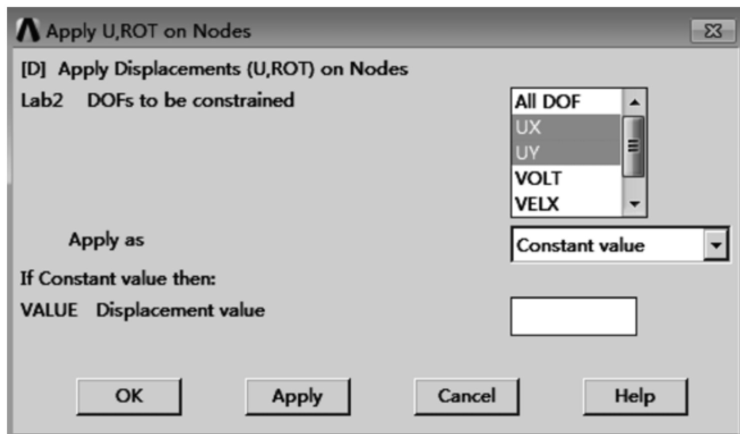


图 7-12 “在节点处施加约束”设置面板

（3）选择所有实体

GUI：Utility Menu→Select→Everything。

3．定义结构电场边界条件

（1）选取功能梯度压电梁顶面节点

GUI：Utility Menu→Select→Entities，弹出如图 7-13 所示的“选取实体”设置面板，设

置选取实体类型为“Nodes”，选取方式为“By Location”，输入 Y 的最小坐标值为“H”，单击“OK”按钮。

（2）约束选取节点的位移

GUI：Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Electric→Boundary→Voltage→On Nodes，弹出“拾取”对话框，单击“Pick All”按钮，弹出如图 7-14 所示的“在节点处施加电压”设置面板，输入电压值为“100”，单击“OK”按钮。

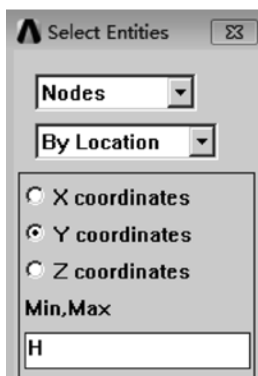


图 7-13 “选取实体”设置面板

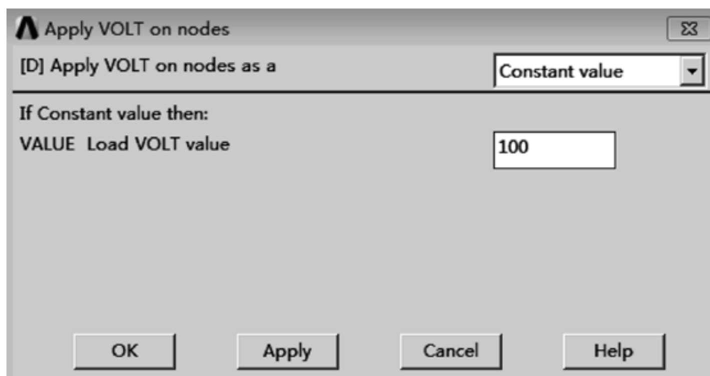


图 7-14 “在节点处施加电压”设置面板

（3）选择所有实体

GUI：Utility Menu→Select→Everything。

4．定义结构载荷

（1）选取功能梯度压电梁右侧中点

GUI：Utility Menu→Select→Entities，弹出如图 7-15 所示的“选取实体”设置面板，设置选取实体类型为“Nodes”，选取方式为“By Location”，输入 X 的最小坐标值为“0.9999*H”，最大坐标值为“H”，单击“Apply”按钮，输入 Y 的最小坐标值为“H/2”，选取范围为“Reselect”，单击“OK”按钮。





图 7-15 “选取实体”设置面板

（2）施加集中力

GUI：Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Force→Moment→On Nodes，弹出“拾取”对话框，单击“Pick All”按钮，弹出如图 7-16 所示的“在节点处施加力/力矩”设置面板，设置施加力的方向为“FY”，并且输入其数值为“-20”，单击“OK”按钮。

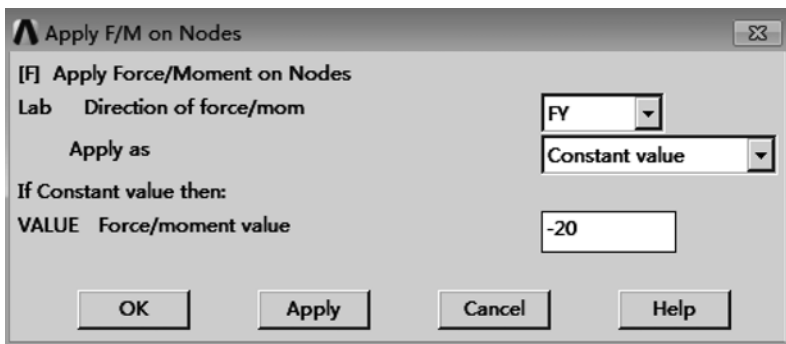


图 7-16 “在节点处施加力/力矩”设置面板

（3）选择所有实体

GUI：Utility Menu→Select→Everything。

5．求解

GUI：Main Menu→Solution→Solve→Current LS，弹出“求解提示”对话框，单击“OK”按钮。

7.6.3 后处理

图 7-17～图 7-19 分别给出了功能梯度压电梁的位移、电压和等效应力云图，图 7-20 给出了节点 1～节点 41342 路径上电压与距离的关系，具体查看方法可以参见本章的视频教程。

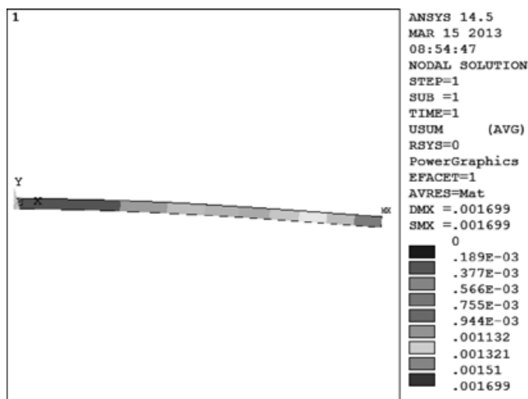


图 7-17 功能梯度压电梁位移云图

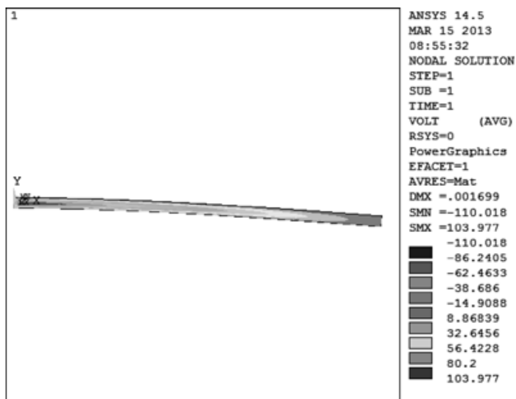


图 7-18 功能梯度压电梁电压云图

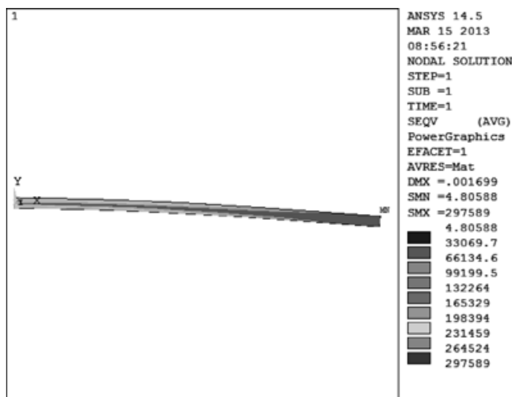


图 7-19 功能梯度压电梁等效应力云图

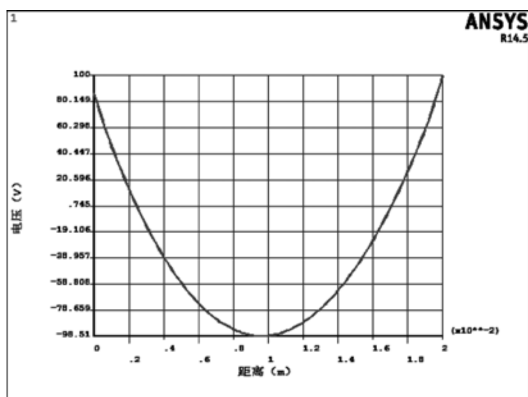


图 7-20 节点 1～节点 41342 路径上电压与距离的关系

7.7 命令流

```
/FILNAME,Piezoelectric beam,0
/PREP7
!设置模型参数
H=0.02
L=0.7
E0=2.2E9              !定义弹性模量
NU=0.31               !定义泊松比
G0=0.775E9            !定义剪切模量
!定义压电应变系数
d310=2.2E-11
d320=0.8E-11
d330=-3.0E-11
!定义常应力相对介电常数
ep110=12
ep220=12
BEITA=10    !功能梯度材料 1 的材料非均匀参数
N=20              !功能梯度材料划分的层数
ET,1,223      !定义多场耦合平面单元
KEYOPT,1,1,1001 !设置单元关键字
!定义功能梯度压力梁材料参数
*DO,I,1,N,1
!定义弹性柔度矩阵
tb,ANEL,I,,,1
tbda,1,1/E0*EXP(BEITA*(H/N*(I-1))),-NU/E0*EXP(BEITA*(H/N*(I-1))),-NU/E0
*EXP(BEITA*(H/N*(I-1)))
tbda,7,1/E0*EXP(BEITA*(H/N*(I-1))),-NU/E0*EXP(BEITA*(H/N*(I-1)))
tbda,12,1/E0*EXP(BEITA*(H/N*(I-1)))
```

```
tbda,16,1/G0*EXP(BEITA*(H/N*(I-1)))
!定义压电应变矩阵
tb,PIEZ,I,,,1
tbda,2,d310*EXP(BEITA*(H/N*(I-1)))
tbda,5,d330*EXP(BEITA*(H/N*(I-1)))
tbda,8,d320*EXP(BEITA*(H/N*(I-1)))
!定义常应力相对介电常数
tb,DPER,I,,,1
tbdata,1,ep110*EXP(BEITA*(H/N*(I-1))),ep220*EXP(BEITA*(H/N*(I-1)))
*ENDDO
!定义局部坐标系
local,11
!定义关键点
K,1,0,0,0
K,2,L,0,0
K,3,L,H
K,4,0,H
!通过关键点定义面
A,1,2,3,4
wprot,0,-90,0 !转动工作平面，绕 Y 轴转动-90 度
!通过循环语句施加网格划分
*DO,I,1,N-1,1
wpoff,0,0,H/N
ASBW,ALL
*ENDDO
!设置网格划分属性
type,1 $ esys,11
ESIZE,H/20   !设置总体单元尺寸
!开始划分网格
*DO,I,1,N,1
ASEL,S,LOC,Y,H/N*(I-1),H/N*I
MAT,I
AMESH,ALL
*ENDDO
ALLSEL,ALL !选择所有实体
/SOL
!定义结构边界条件
NSEL,ALL
NSEL,S,LOC,X,0
NPLOT
D,ALL, , , , , ,UX,UY, , , ,
ALLSEL,ALL
!定义结构电场边界条件
NSEL,ALL
```



```
NSEL,S,LOC,Y,H
NPLOT
D,ALL,VOLT,100
ALLSEL,ALL
!定义集中力载荷
NSEL,ALL
NSEL,S,LOC,X,0.9999*L,L
NSEL,R,LOC,Y,H/2
F,ALL,FY,-20
ALLSEL,ALL
!开始求解
SOLVE
```

第 8 例　温度对于装配体接触应力影响分析

8.1　实例覆盖的知识点

读者通过学习该实例可以掌握如下 ANSYS 的知识点。

1）直接法热-结构的分析步骤。

2）激活双线性等向强化模型的方法。

3）使用接触向导创建接触对的方法。

4）使用接触初始调整功能实现过盈配合的方法。

5）激活大变形的方法。

6）施加对称边界条件的方法。

8.2　模型

图 8-1 给出了轴-盘装配体模型简图，模型的几何尺寸如图 8-1 所示，单位为 mm。

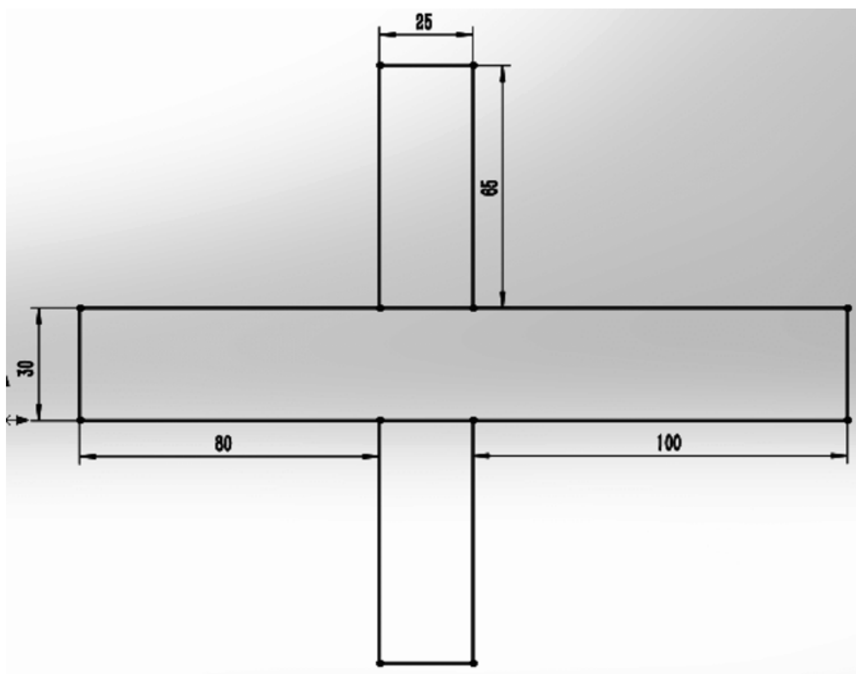


图 8-1　轴-盘装配体模型简图

8.3 单元

本实例选用多场耦合单元 SOLID226，并设置其单元关键字来激活热-结构耦合分析，轴-盘接触对中的接触单元和目标单元使用接触向导自动生成。



8.4 材料参数

轴和盘使用双线性等向强化模型，轴的弹性模量为 E1=2.11E11Pa，泊松比为 0.3，屈服应力为 450MPa，切线模量为 2E10Pa，密度为 7800Kg/m^3，比热为 350 J/Kg/℃，导热系数为 40W/m/℃，热膨胀系数为 3.6E-5，圆盘的弹性模量为 2.01E11Pa，泊松比为 0.31，屈服应力为 400MPa，切线模量为 1.2E10Pa，密度为 7500Kg/m^3，比热为 370J/Kg/℃，导热系数为 43 W/m/℃，热膨胀系数为 1.7E-5。

8.5 边界条件和载荷

该实例的载荷为温度，环境环境温度从室温 20℃升至 130℃时，假设轴-盘装配体表面与环境之间的对流换热系数为 30，完全约束轴的两个端面，由于模型的对策性，本实例使用 1/4 模型，因此在对称面上施加对称约束，初始过盈量为 0.002m。

8.6 GUI 操作

8.6.1 前处理

1．定义文件名

GUI：Utility Menu→File→Change Jobname，弹出一个对话框，在输入栏中输入“Assembly contact stress”，单击“OK”按钮。

2．定义参数

在命令输入窗口中输入：圆盘的外半径 R1 为“0.08”，圆盘的内半径 R2 为“0.015”，圆盘的厚度 H 为“0.025”，左侧轴长 L1 为“0.08”，右侧轴长 L2 为“0.1”，初始过盈量 sf 为“0.002”。

3．选择单元

（1）定义单元

GUI：Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete，单击“Add”按钮，弹出如图 8-2 所示的“单元类型选择”对话框，在弹出对话框的左边选择“Coupled Field”选项，在右边选择“Brick 20node 226”单元，单击“OK”按钮。

（2）设置单元关键字

在“单元类型选择”对话框中选择“SOLID226”，然后单击“Options”选项，弹出如图 8-3 所示的“SOLID226 单元关键字”设置面板，设置“Analysis Type”为“Structural-

thermal”，单击“OK”按钮；返回单元类型界面，然后单击“Close”按钮关闭对话框。

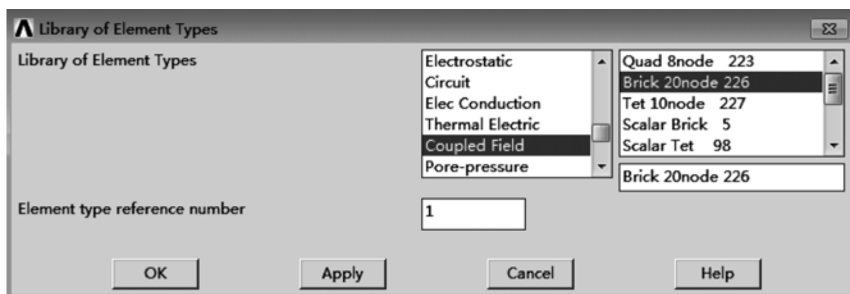


图 8-2 “单元类型选择”对话框

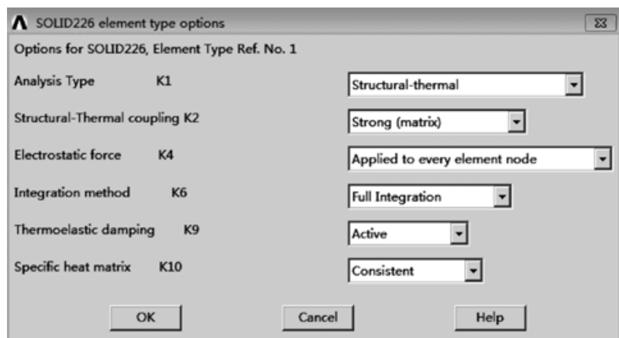


图 8-3 “SOLID226 单元关键字”设置面板

4．定义材料模型

GUI：Main Menu→Preprocessor→Material Props→Material Models，弹出一个对话框，单击 Structural→Liner→Elastic→Isotropic，弹出如图 8-4 所示的“线弹性各向同性材料属性参数”设置面板，输入 EX 为“2.11E11”，PRXY 为“0.3”。

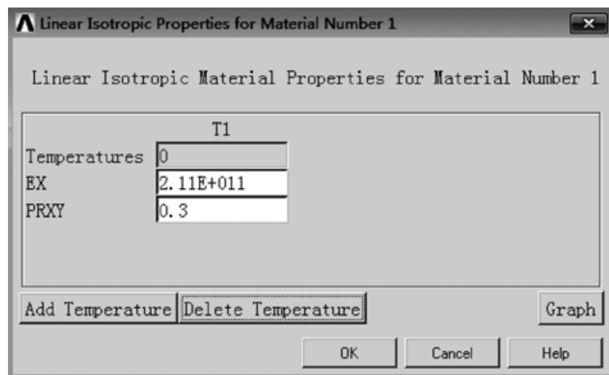


图 8-4 “线弹性各向同性材料属性参数”设置面板

设置材料的应力应变关系为双线性等向强化，单击 Structural→Nonlinear→Inelastic→Rate Independent→Mises Plasticity→Bilinear，弹出如图 8-5 所示的“双线性等向强化模型”设置面板，输入 Yield Stss 为“4.5E8”，Tang Mod 为“2E10”，单击“OK”按钮。

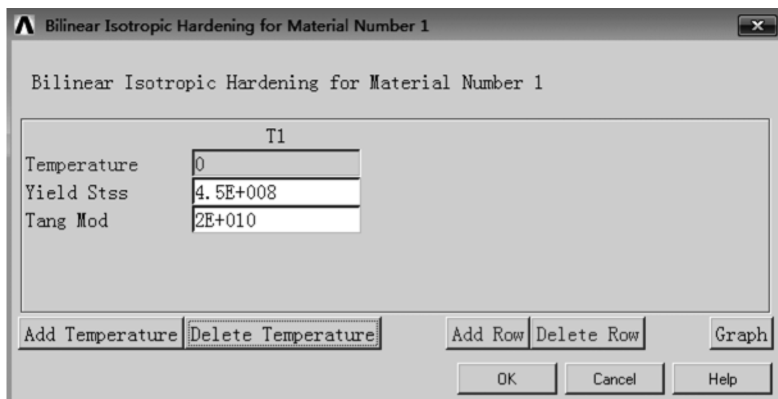


图 8-5 “双线性等向强化模型”设置面板

设置材料的密度，单击 Structural→Density，弹出如图 8-6 所示的“材料密度”设置面板，输入 DENS 为“7800”，单击“OK”按钮。

设置材料的比热，单击 Thermal→Specific Heat，弹出如图 8-7 所示的“材料比热”设置面板，输入 C 为“350”，单击“OK”按钮。

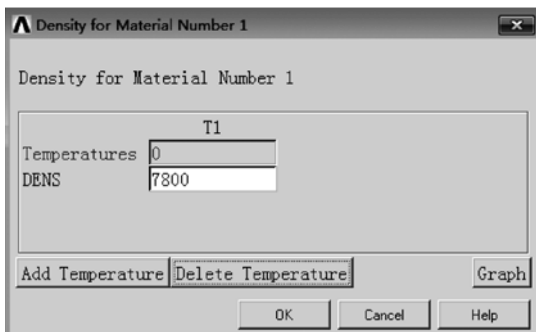


图 8-6 “材料密度”设置面板

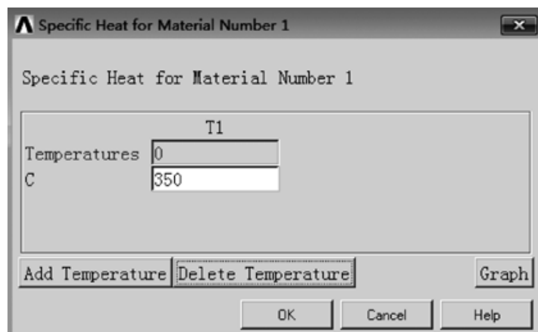


图 8-7 “材料比热”设置面板

设置热膨胀系数，单击 Structural→Thermal Expansion→Secent Coefficiemt→Isotropic，弹出如图 8-8 所示的“材料的热膨胀系数”设置面板，输入参考温度“20”，热膨胀系数 ALPX 为“3.6E-5”，单击“OK”按钮。

设置热传导系数，单击 Thermal→Conductivity，弹出如图 8-9 所示的“材料的导热系数”设置面板，输入导热系数 KXX 为“40”，单击“OK”按钮。

选择 Material→New Model，单击“OK”按钮，按照输入第一种材料参数的方法，输入第二种材料参数：EX 为“2.01E11”，PRXY 为“0.3”，Yield Stss 为“400E6”，Tang Mod 为“1.2E10”，DENS 为“7500”，ALPX 为“1.7E-5”，参考温度也为“20”，KXX 为“43”，设置完毕后单击“OK”按钮。

5．建立模型

（1）创建 1/4 圆柱体

GUI： Main Menu → Preprocessor → Modeling → Create → Volumes → Cylinder → By Dimensions，弹出如图 8-10 所示的“通过尺寸创建圆柱体”设置面板，输入圆柱体的外半

径 RAD1 为“R1”，圆柱体的内半径 RAD2 为“R2”，Z 坐标为“0”到“H”，起始角度为“0”，终止角度为“90”，单击“Apply”按钮，继续输入 RAD1 为“R2”，RAD2 为“0”，Z1 为“-L1”，Z2 为“0”，THETA1 为“0”，THETA2 为“90”，单击“Apply”按钮；继续输入 RAD1 为“R2”，RAD2 为“0”，Z1 为“H”，Z2 为“H+L2”，THETA1 为“0”，THETA2 为“90”，单击“OK”按钮。

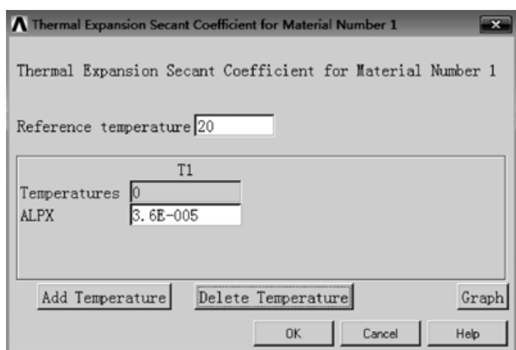


图 8-8 “材料的热膨胀系数”设置面板

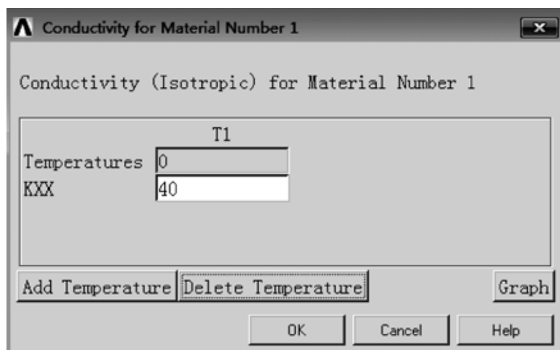


图 8-9 “材料的导热系数”设置面板

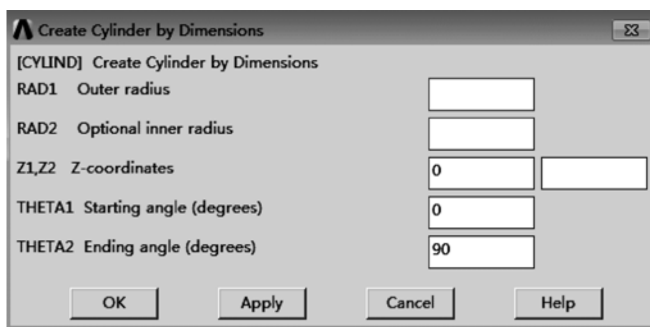


图 8-10 “通过尺寸创建圆柱体”设置面板

（2）进行粘结布尔操作

GUI：Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Glue→Volumes，弹出“拾取”对话框，拾取体 2 和 3，单击“Apply”按钮，继续拾取体 5 和 4，单击“OK”按钮。

6．划分网格

（1）打开网格划分工具

GUI：Main Menu→Preprocessor→Meshing→MeshTool。

（2）设置总体网格尺寸

选择如图 8-11 所示的“网格划分”工具面板中“尺寸控制”子面板中的“Global”选项并单击“Set”按钮，弹出如图 8-12 所示的“总体网格尺寸”设置面板。

该设置面板中存在两个控制选项，“Element edge length”和“No. of element divisions”，在单元尺寸中输入“0.004”，单击“OK”按钮。

（3）为轴设置网格属性

单击“网格划分”工具面板上的“Element Attributes”区域的“Set”按钮，弹出如图 8-13

所示的“网格属性”设置面板，按照图 8-13 进行设置，单击“OK”按钮。



图 8-11 “网格划分”工具面板中“尺寸控制”子面板

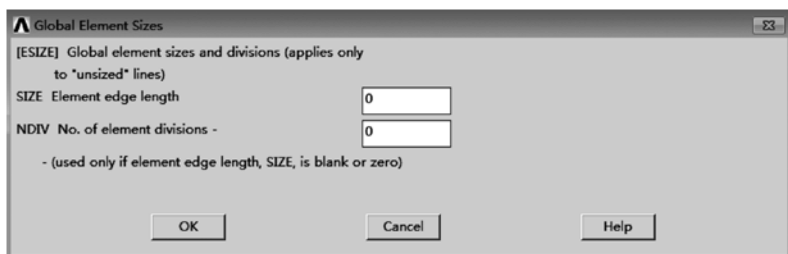


图 8-12 “总体网格尺寸”设置面板

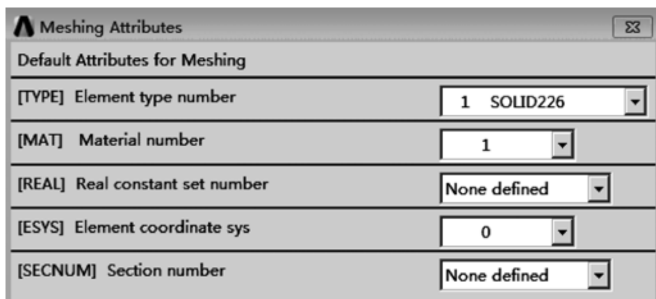


图 8-13 “网格属性”设置面板

（4）划分轴网格

选择网格划分工具中的“Shape”状为“Hex/Wedge”，划分方法为“Sweep”，单击“Sweep”按钮，弹出“拾取”对话框，用鼠标拾取体 2、3 和 4，单击“OK”按钮。

（5）为盘设置网格属性

单击“网格划分”工具面板上的“Element Attributes”区域的“Set”按钮，弹出如图 8-13 所示的“网格属性”设置面板，将“Material number”设为“2”，单击“OK”按钮。

（6）划分轴网格

选择网格划分工具中的“Shape”状为“Hex/Wedge”，划分方法为“Sweep”，单击“Sweep”按钮，弹出“拾取”对话框，用鼠标拾取体 1，单击“OK”按钮。

7. 定义轴-盘之间的接触对

（1）打开接触管理器

单击主菜单中的图标，打开如图 8-14 所示的“接触管理器”面板。

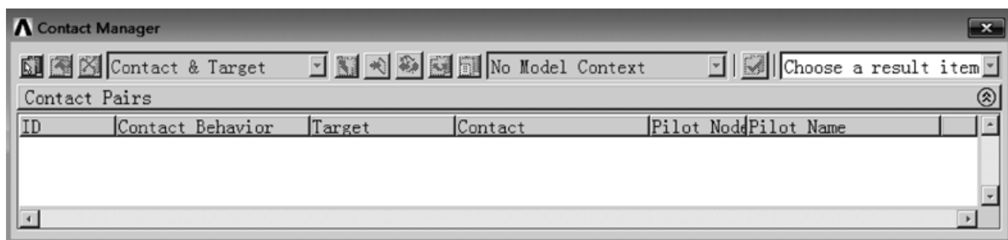


图 8-14 “接触管理器”面板

（2）定义轴-盘之间的接触对

单击接触管理器中的图标，弹出如图 8-15 所示的“目标面及目标单元类型”设置面板，在该面板中“Target Surface”选择“Areas”，“Target Type”选择“Flexible”，单击“Pick Target”按钮，弹出“拾取”对话框，拾取面 A4，单击“Apply”按钮；然后单击图 8-15 所示的“Next”按钮，弹出图 8-16 所示的“接触面及接触单元类型”设置面板，在该面板中“Contact Surface”选择“Areas”，“Contact Element Type”选择“Surface-to-Surface”，单击“Pick Contact”按钮，拾取面 A12，单击“Apply”按钮；单击图 8-16 中的“Next”按钮，弹出图 8-17 所示的“创建接触对”面板，输入摩擦系数为“0.1”，热接触导热系数为“2E6”，单击“Optional settings”按钮，弹出如图 8-18 所示的“接触对属性”设置面板，设置“Initial penetration”为“Include offset only with ramped effect”，“Contact surface offse”为“sf”，“Automatic contact adjustment”选项为“Reduce penetration”，“Initial contact closure”系数为“0.2”，返回图 8-17 所示“创建接触对”面板，单击“Creat”按钮来创建接触对。



图 8-15 “目标面及目标单元类型”设置面板

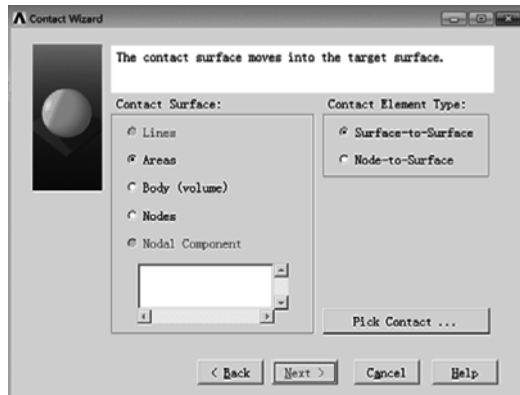


图 8-16 “接触面及接触单元类型”设置面板

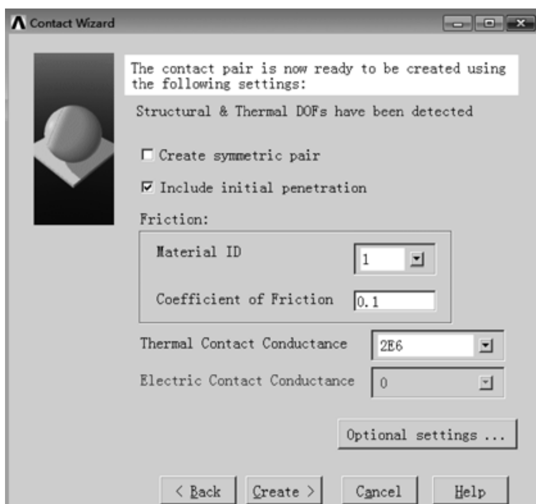


图 8-17 “创建接触对”面板

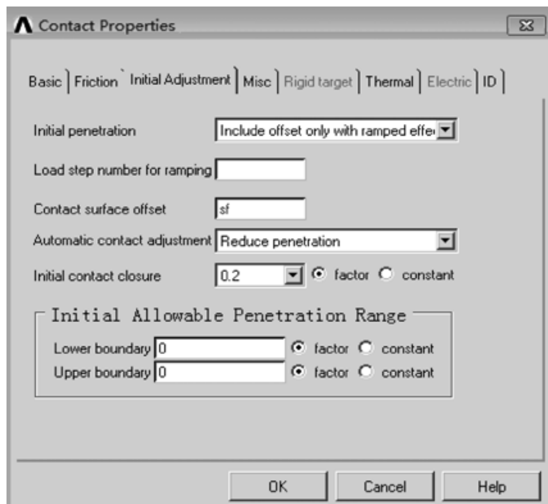


图 8-18 “接触对属性”设置面板

8.6.2 求解

1．设置分析类型

（1）激活静力学分析

GUI：Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis，弹出如图 8-19 所示的“分析类型”设置面板，选择“Transient”选项，单击“OK”按钮。

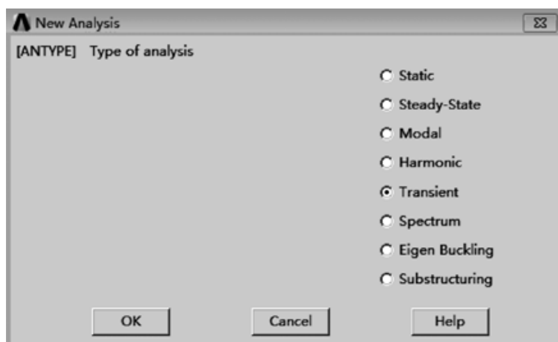


图 8-19 “分析类型”设置面板

（2）设置分析选项

GUI：Main Menu→Preprocessor→Loads→Analysis Type→Analysis Options，弹出如图 8-20 所示的“瞬态分析选项”设置面板，勾选“Large deform effects”复选框，激活大变形分析，其他设置保存默认设置，单击“OK”按钮。

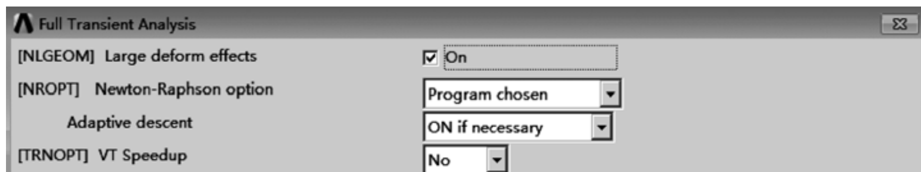


图 8-20 “瞬态分析选项”设置面板

（3）设置方程求解器

GUI：Main Menu→Solution→Analysis Type→Sol'n Controls→Sol'n Options，弹出如图 8-21 所示的“求解选项”设置面板，“Equation Solvers”选择“Sparse direct 选项”，单击“OK”按钮。

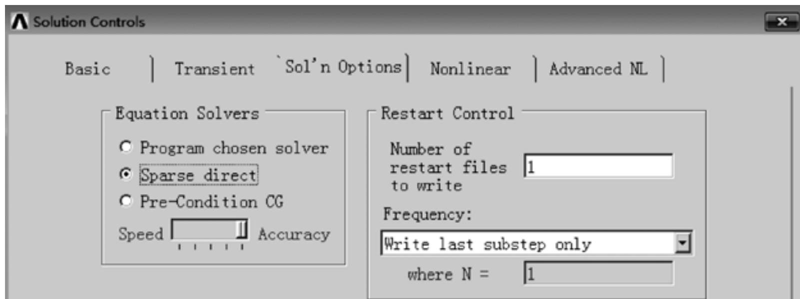


图 8-21 “求解选项”设置面板

2．载荷的基本设置

（1）定义初始均匀温度

GUI：Main Menu→Solution→Define Loads→Settings→Uniform Temp，弹出如图 8-22 所示的“均匀温度”设置面板，“Uniform temperature”设为“20”，单击“OK”按钮。

（2）定义模型的参考温度

GUI：Main Menu→Solution→Define Loads→Settings→Reference Temp，弹出如图 8-23 所示的“参考温度”设置面板，“Reference temperature-for thermal strain calculations”为“20”，单击“OK”按钮。

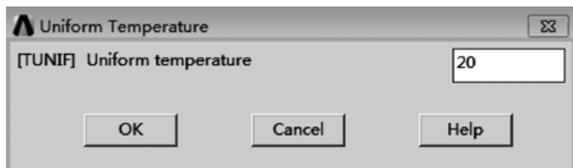


图 8-22 “均匀温度”设置面板

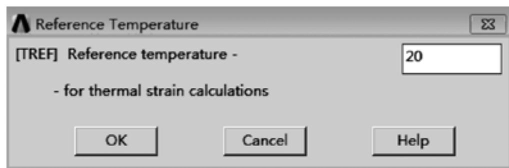


图 8-23 “参考温度”设置面板

3．定义结构位移边界条件

（1）定义对称边界条件

GUI：Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→Symmetry B.C.→On Areas，弹出“拾取”对话框，拾取面 A11、A14、A21、A6、A5、A15、A20 和 A19，单击“OK”按钮。

（2）定义轴的端部约束

GUI：Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Areas，弹出“拾取”对话框，拾取轴的两个端面 A7 和 A18，单击“OK”按钮，弹出如图 8-24 所示的“在面处施加约束”设置面板，DOFs“UX”，单击“Apply”按钮，继续拾取轴的两个端面 A7 和 A18，单击“OK”按钮，在弹出的面板中 DOFs“UY”，单击“Apply”按钮，继续拾取轴的两个端面 A7 和 A18，单击“OK”按钮，在弹出的面板中 DOFs“UZ”，单击“OK”按钮。

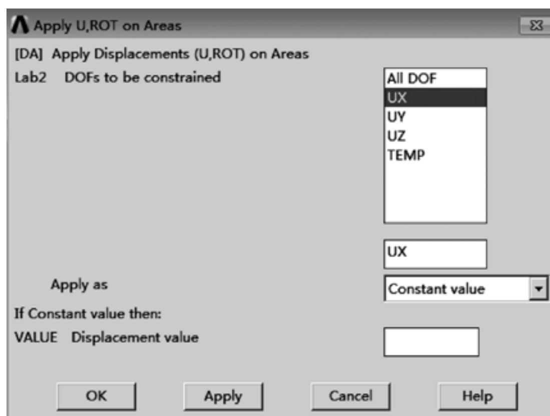


图 8-24 “在面处施加约束”设置面板

4．定义结构热边界条件

GUI：Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Thermal→Convection→On Areas，弹出“拾取”对话框，拾取面 A3、A2、A19、A1、A9、A18 和 A7，单击“OK”按钮，弹出如图 8-25 所示的“在面处施加对流换热系数”设置面板，“Film Coefficient”设为“30”，“Bulk temperature”设为“130”，单击“OK”按钮。

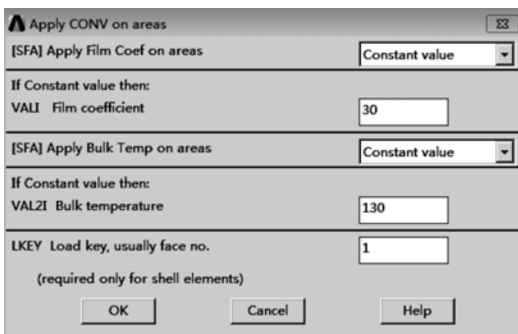


图 8-25 “在面处施加对流换热系数”设置面板

5．定义载荷步选项

（1）设置输出控制

GUI：Main Menu→Solution→Load Step Opts→Output Ctrls→DB/Results File，在弹出的“计算结果输出”控制面板中选择“Every substep”，单击“OK”按钮。

（2）设置计算时间和子步

GUI：Main Menu→Solution→Load Step Opts→Time→Frequenc→Time→Time Step，弹出如图 8-26 所示的“时间和时间步选项”设置面板，“Time at end of load step”设为“3600”，“Time step size”设为“50”，“Stepped or ramped b.c.”选择“Stepped”，“Automatic time stepping”选择“ON”，其他保持默认设置，单击“OK”按钮。

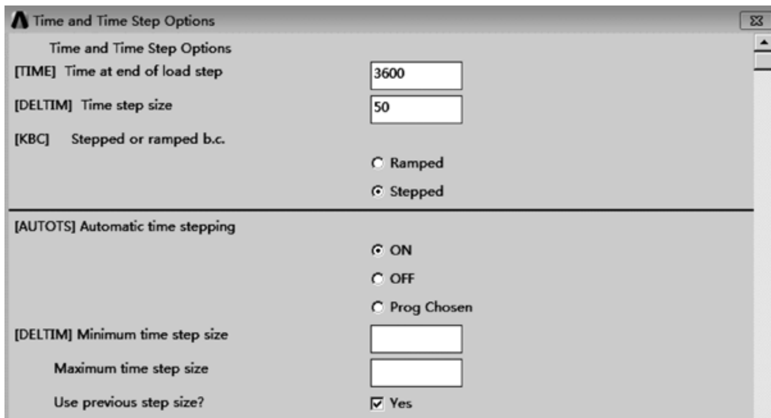


图 8-26 “时间和时间步选项”设置面板

6．求解

GUI：Main Menu→Solution→Solve→Current LS，弹出“求解提示”对话框，单击“OK”按钮。



8.6.3 后处理

图 8-27～图 8-32 分别给出了轮-盘结构不同时刻的温度、等效应力云图，图 8-33～图 8-36 分别给出了不同时刻的轮-盘接触面的压力云图，图 8-37～图 8-40 分别给出了不同节点处温度、接触压力、等效应力和等效塑性应变随时间的变化关系，具体查看方法用户参见本章视频教程。

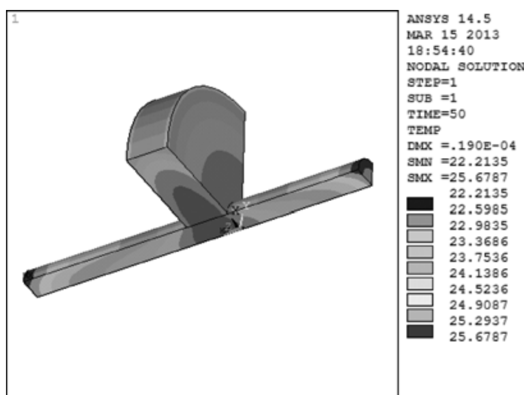


图 8-27　轴-盘结构 50s 时刻的温度云图

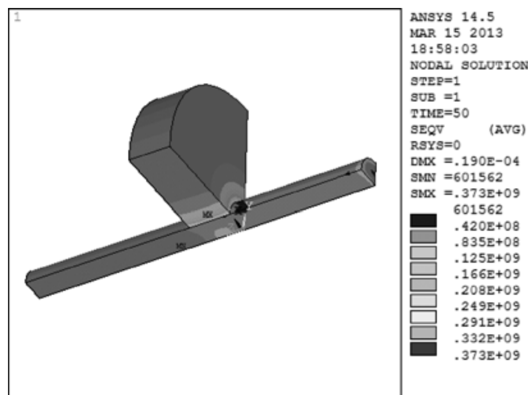


图 8-28　轴-盘结构 50s 时刻的等效应力云图

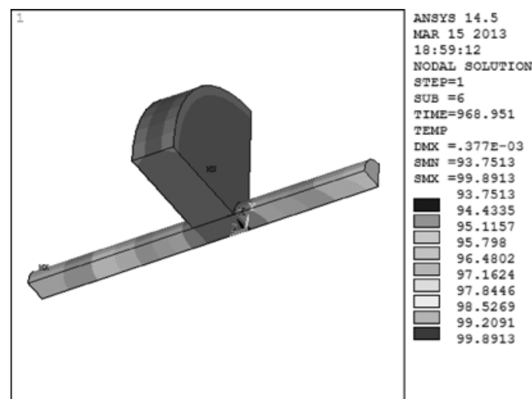


图 8-29　轴-盘结构 968s 时刻的温度云图

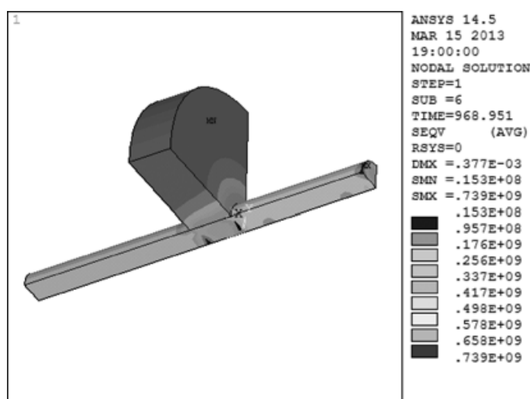


图 8-30　轴-盘结构 968s 时刻的等效应力云图

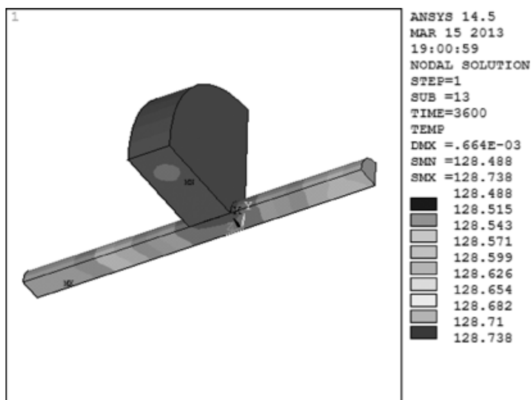


图 8-31　轴-盘结构 3600s 时刻的温度云图

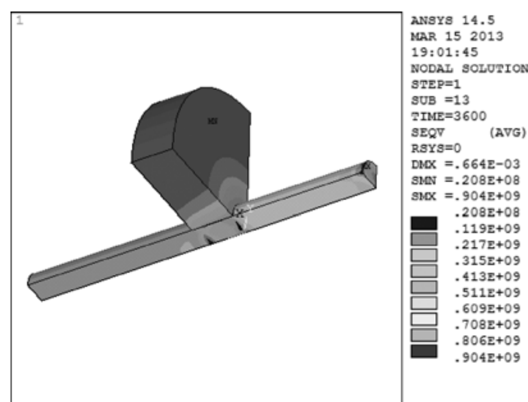


图 8-32　轴-盘结构 3600s 时刻的等效应力云图

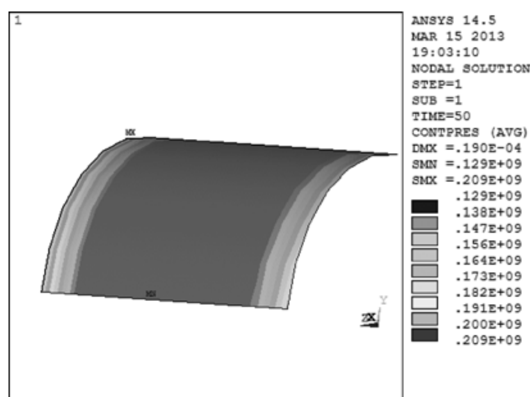


图 8-33 轴-盘结构 50s 时刻的接触压力云图

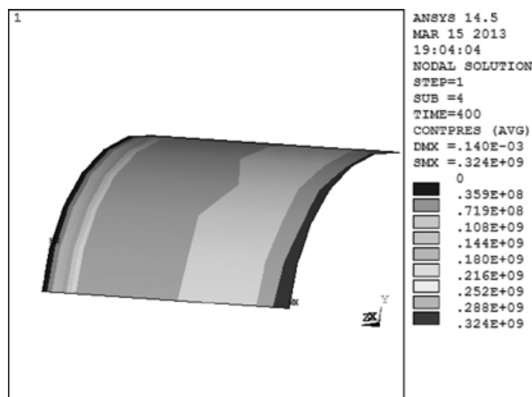


图 8-34 轴-盘结构 400s 时刻的接触压力云图

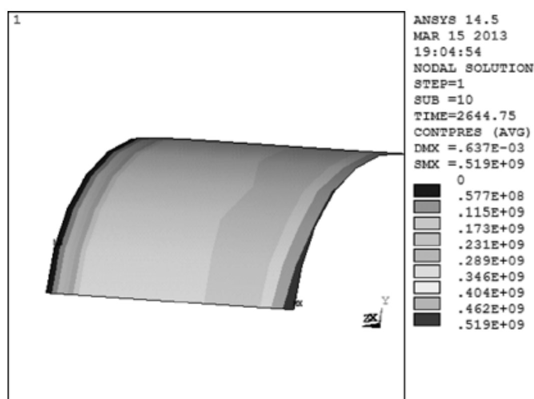


图 8-35 轴-盘结构 2644s 时刻的接触压力云图

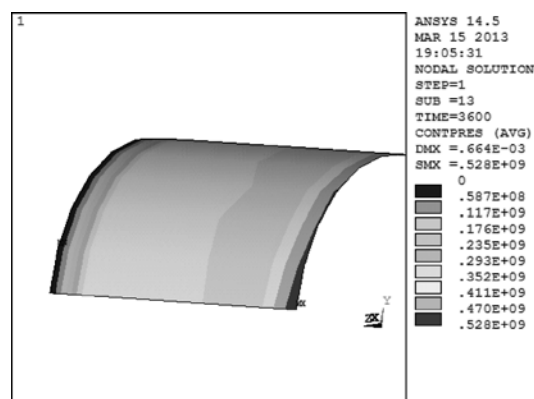


图 8-36 轴-盘结构 3600s 时刻的接触压力云图

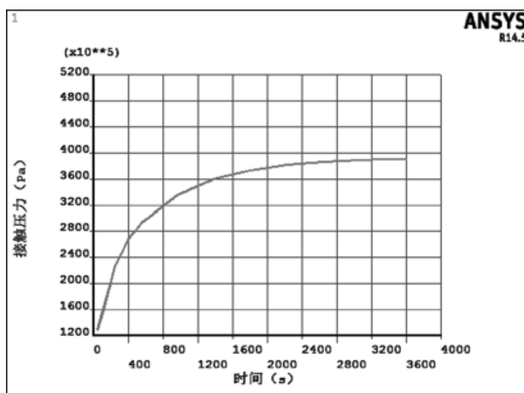


图 8-37 1829 节点处接触压力与时间的关系

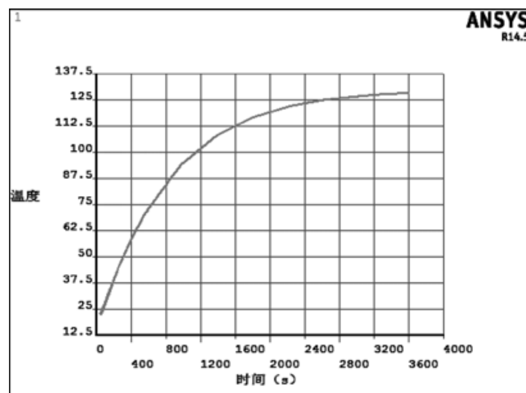


图 8-38 1829 节点处温度与时间的关系



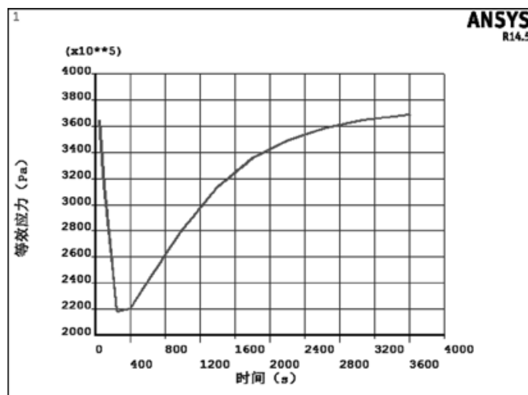


图 8-39　5441 节点处等效应力与时间的关系

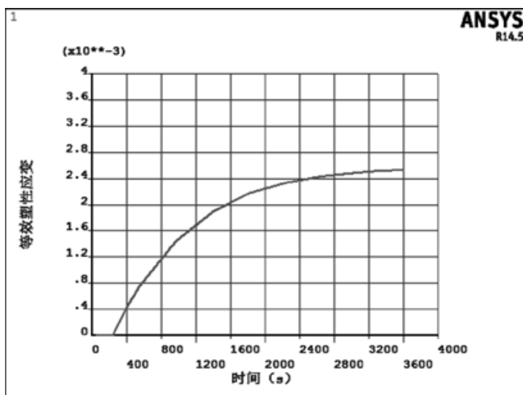


图 8-40　5555 节点处等效塑性应变与时间的关系

8.7　命令流

```
/FILNAME,Assembly contact stress,0
/PREP7
!带孔圆盘的基本尺寸；
R1=0.08
R2=0.015
H=0.025
!轴的基本尺寸；
L1=0.08
L2=0.1
!过盈量 f;
sf=0.002
ET,1,solid226,11 !定义热-结构单元
!定义轴的材料参数
MP,EX,1,2.11E11
MP,PRXY,1,0.3
MP,DENS,1,7800
MP,KXX,1,40
MP,C,1,350
UIMP,1,REFT,,,20
MP,ALPX,1,3.6E-5
TB,BISO,1,1,2,
TBDATA,,450E6,2E10,,,,
!定义盘的材料参数
MP,EX,2,2.01E11
MP,PRXY,2,0.31
MP,DENS,2,7500
MP,KXX,2,43
MP,C,2,370
UIMP,2,REFT,,,20
```



```
MP,ALPX,2,1.7E-5
  TB,BISO,2,1,2,
TBDATA,,400E6,1.2E10,,,,
!建立模型
CYLIND,R1,R2,0,H,0,90,
CYLIND,R2,0,-L1,0,0,90,
CYLIND,R2,0,0,H,0,90,
CYLIND,R2,0,H,H+L2,0,90,
!进行布尔操作，将体粘结在一起
VGLUE,2,3
VGLUE,5,4
!划分网格
ESIZE,0.004
MAT,1
VSWEEP,2
VSWEEP,3
VSWEEP,4
MAT,2
VSWEEP,1
!定义接触对
!创建接触对的方法读者可以参见本章的视频教程
/SOL
ANTYPE,4     !定义瞬态分析
NLGEOM,1     !激活大变形分析
!设置初始温度
TUNIF,20,
!设置初始参考温度
TREF,20,
!设置方程求解器
EQSLV,SPAR
!定义结构位移边界条件
DA,11,SYMM
DA,14,SYMM
DA,21,SYMM
DA,6,SYMM
DA,5,SYMM
DA,15,SYMM
DA,20,SYMM
DA,19,SYMM
DA,7,UX,
DA,7,Uy,
DA,7,Uz,
DA,18,UX,
DA,18,Uy,
DA,18,Uz,
!定义热边界条件
```

```
SFA,3,1,CONV,30,130
SFA,2,1,CONV,30,130
SFA,19,1,CONV,30,130
SFA,1,1,CONV,30,130
SFA,9,1,CONV,30,130
SFA,18,1,CONV,30,130
SFA,7,1,CONV,30,130
!定义载荷步
OUTRES,ALL,ALL,
TIME,3600
AUTOTS,1
DELTIM,50, , ,1
KBC,1
TSRES,ERASE
!开始求解
SOLVE
```

第 9 例　基于生死单元法的平板填充焊接温度场分析



9.1　实例覆盖的知识点

读者通过学习该实例可以掌握如下 ANSYS 的知识点。

1）瞬态热分析的步骤。

2）由面网格实现体网格的方法。

3）设置程序中角度单位的方法。

4）生-死单元的使用。

5）设置非线性求解的方法。

6）APDL 语言循环语句的使用。

9.2　模型

如图 9-1 和图 9-2 分别给出了平板填充焊接力学模型的俯视图和侧视图，平板模型的长度为 0.2m，半宽度为 0.1m，厚度为 0.01m，焊接坡度角度为 30°。

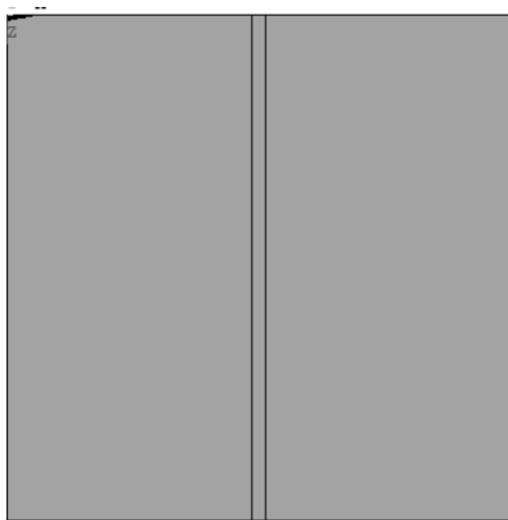


图 9-1　平板填充焊接力学模型俯视图



图 9-2　平板填充焊接力学模型侧视图

9.3 单元

本实例选用平面热分单元 PLANE77 和实体热分析单元 SOLID70，使用 PLANE77 划分模型的平面模型，然后使用 SOLID70 拉伸平面网格形成体网格。

9.4 材料参数

该实例只进行热分析，因此需要以下材料参数：导热系数为 43，比热为 400，密度为 7800kg/m^3。

9.5 边界条件和载荷

除了焊道平面外，在平板所有平面施加对流边界条件，对流换热系数为 30，环境温度为 20。该实例的载荷为生热率其值为 1.8E10W/m^3。

9.6 GUI 操作

9.6.1 前处理

1．定义文件名

GUI：Utility Menu→File→Change Jobname，弹出一个对话框，在输入栏中输入“Life and death element method”，单击“OK”按钮。

2．定义参数

在命令输入窗口中输入：平板的半宽 W 为“0.1”，平板的厚度 H 为“0.01”，平板的长度 L 为“0.2”，焊缝的坡度角 SEITA 为“30”，生热率 HS 为“1.8E10”，焊接速度 V 为“0.01”。

3．选择单元

GUI：Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete，单击“Add”按钮，弹出如图 9-3 所示的“单元类型选择”对话框，在弹出对话框的左边选择“Thermal Solid”，然后在右边选择“8node 77”单元，单击“Apply”按钮，继续在右边选择“Brick 8node 70”，单击“OK”按钮。

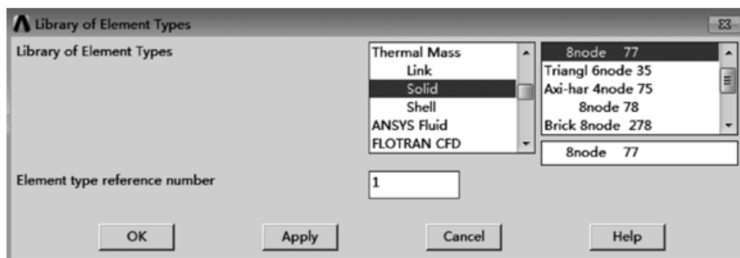


图 9-3 “单元类型选择”对话框

4．定义材料模型

设置材料的密度，单击 Structural→Density，弹出如图 9-4 所示的“材料密度”设置面板，输入 DENS 为“7800”，单击“OK”按钮。



设置材料的比热，单击 Thermal→Specific Heat，弹出如图 9-5 所示的“材料比热”设置面板，输入 C 为“400”，单击“OK”按钮，

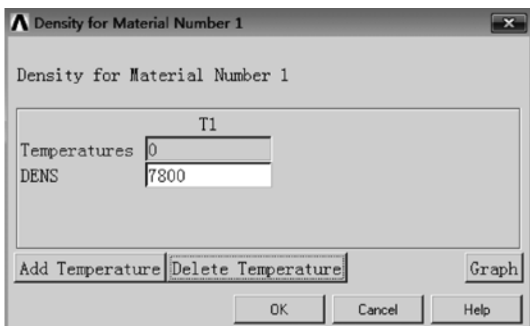


图 9-4 “材料密度”设置面板

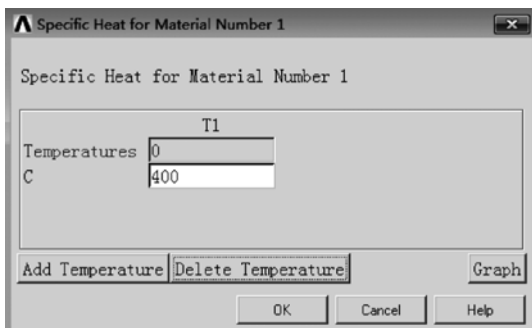


图 9-5 “材料比热”设置面板

设置热传导系数，单击 Thermal→Conductivity，弹出如图 9-6 所示的“材料的导热系数”设置面板，输入 KXX 为“43”，单击“OK”按钮。

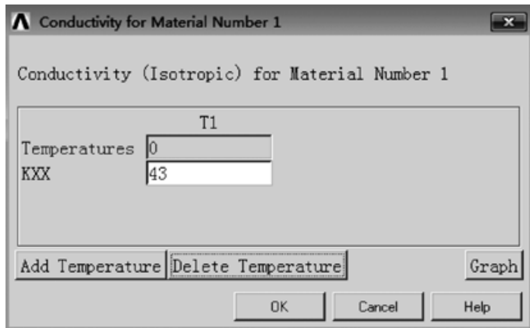


图 9-6 “材料的导热系数”设置面板

5．建立模型

（1）设置角度单位

GUI：Utility Menu→Parameters→Angular Units，弹出如图 9-7 所示的“角度单元”设置面板，“Units for angular”选择“Degree DEG”，单击“OK”按钮。

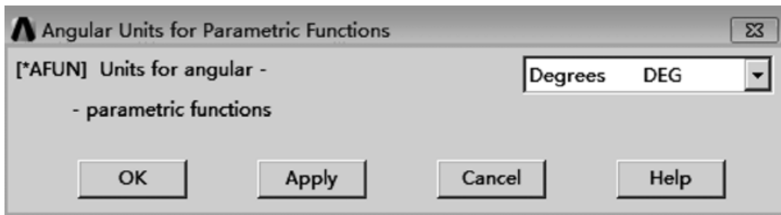


图 9-7 “角度单元”设置面板



（2）建立关键点

GUI：Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Keypoints→In Active CS，弹出如图 9-8 所示的“在激活坐标系创建关键点”设置面板，“Keypoint number”设为“1”，对应坐标为 X=0，Y=0，Z=0，单击“Apply”按钮；“Keypoint number”设为“2”，对应坐标为 X=W，Y=0，Z=0，单击“Apply”按钮；“Keypoint number”为“3”；对应坐标为 X=2*W，Y=0，Z=0，单击“Apply”按钮；“Keypoint number”设为“4”，对应坐标为 X=2*W，Y=H，Z=0，单击“Apply”按钮；“Keypoint number”设为 5，对应坐标为 X=W+H/TAN(90−SEITA/2)，Y=H，Z=0，单击“Apply”按钮；“Keypoint number”设为“6”，对应坐标为 X=W−H/TAN(90−SEITA/2)，Y=H，Z=0，单击“Apply”按钮；“Keypoint number”设为“7”，对应坐标为 X=0，Y=H，Z=0，单击“Apply”按钮；“Keypoint number”设为“8”，对应坐标为 X=0，Y=0，Z=L，单击“OK”按钮。

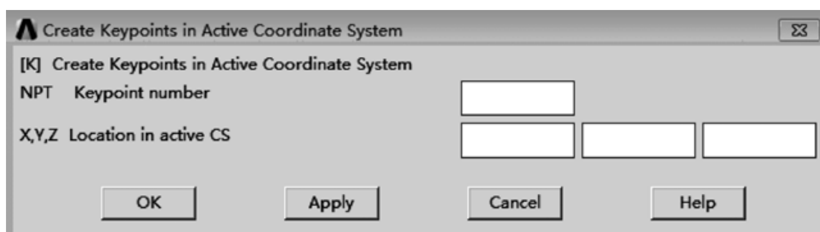


图 9-8 “在激活坐标系创建关键点”设置面板

（3）建立面

GUI：Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Arbitrary→Through KPs，弹出如图 9-9 所示的“通过关键创建面”拾取面板，用户在拾取面板中，“Keypoint number”设为 1、2、6、7，单击“Apply”按钮；“Keypoint number”设为 2、5、6，单击“Apply”按钮；“Keypoint number”设为 2、3、4、5，单击“OK”按钮。

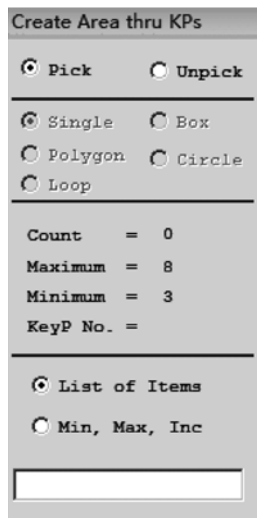


图 9-9 通过关键点创建面拾取面板

（4）定义直线

GUI：Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Lines→ Lines→In Active Coord，弹出“拾取”对话框，拾取关键点 1 和 8，单击“OK”按钮。

6．划分网格

（1）打开网格划分工具

GUI：Main Menu→Preprocessor→Meshing→MeshTool。

（2）设置线的网格划分份数

按照下列方式操作网格划分工具。

单击 Size Controls→Lines→Set，弹出“拾取”对话框，拾取线 L3 和 L7，单击“Apply”按钮，弹出如图 9-10 所示的“在拾取的线上设置单元尺寸”面板，“No. of element divisions”设为“30”，“Spacing ratio”设为“10”，单击“Apply”按钮；继续拾取线 L9 和 L1，单击“Apply”按钮，弹出如图 9-10 所示的“在拾取的线上设置单元尺寸”面

板，“No. of element divisions”设为“30”，“Spacing ratio”设为“0.1”，单击“Apply”按钮；继续拾取线 L6，L2 和 L5，单击“Apply”按钮，弹出如图 9-10 所示的“在拾取的线上设置单元尺寸”面板，“No. of element divisions”设为“8”，删除“Spacing ratio”的设置值，单击“OK”按钮。

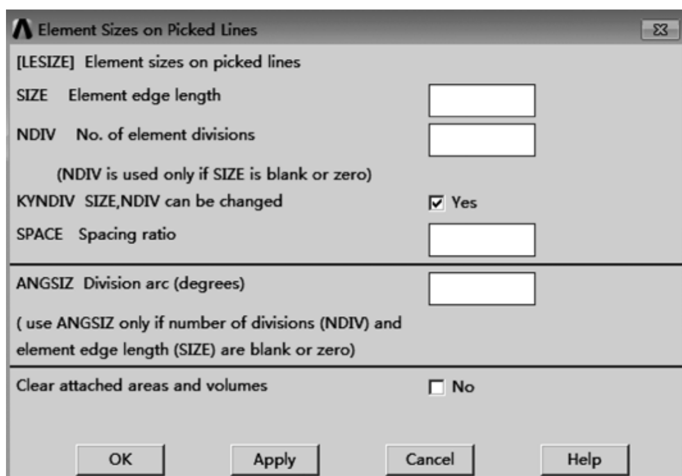


图 9-10 “在拾取的线上设置单元尺寸”面板

（3）划分面网格

单击“网格划分”工具面板上的“Mesh”按钮，弹出“拾取”对话框，单击“Pick All”按钮。

（4）设置拉伸网格的属性

GUI：Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Extrude→Elem Ext Opts，弹出如图 9-11 所示的“拉伸网格的属性”设置面板，“Element type number”选择“2 SOLID70”，“No. Elem divs”设为“80”，勾选“Clear area(s) after ext”复选框，单击“OK”按钮。

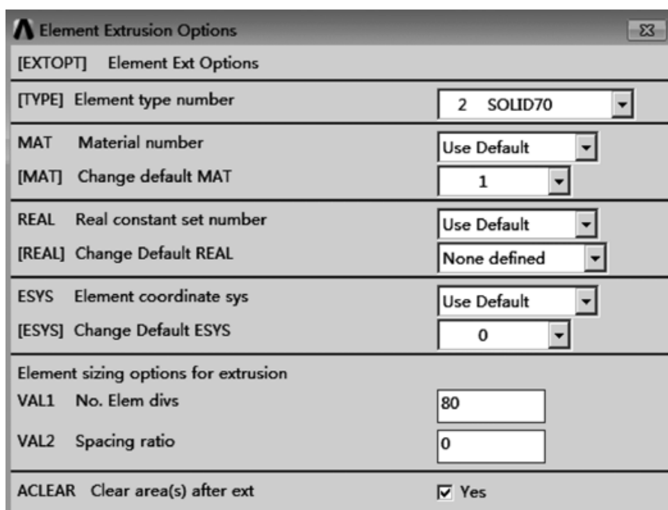


图 9-11 “拉伸网格的属性”设置面板

（5）将面网格拉伸成体网格

GUI：Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Extrude→Areas→Along Lines，弹出“拾取”对话框，单击“Pick All”按钮，继续拾取线 L10，单击“OK”按钮。

9.6.2 求解

1．设置分析类型

（1）设置使用完全牛顿法求解

GUI：Main Menu→Solution→Analysis Type→Analysis Options，弹出如图 9-12 所示的“分析选项”设置面板，“Newton-Raphson options”选择“Full N-R”，单击“OK”按钮。

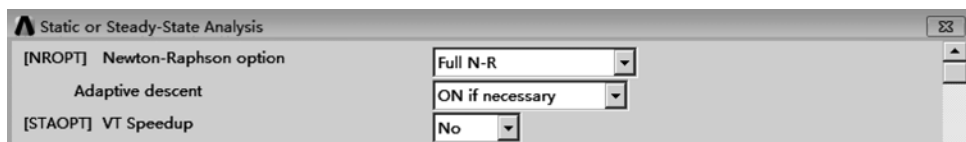


图 9-12 “分析选项”设置面板

（2）激活瞬态分析

GUI：Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis，弹出如图 9-13 所示的“分析类型”设置面板，选择“Transient”，单击“OK”按钮，弹出如图 9-14 所示的“瞬态热分析”设置面板，“Solution method”选择“Full”，单击“OK”按钮。

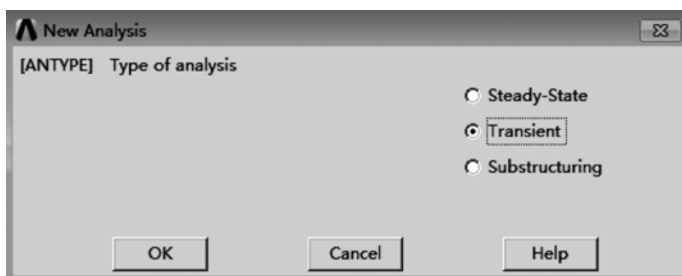


图 9-13 “分析类型”设置面板

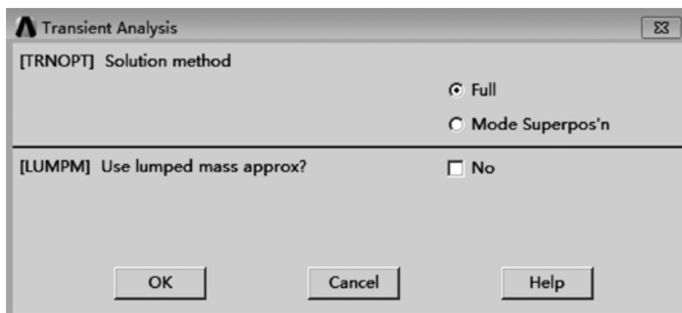


图 9-14 “瞬态热分析”设置面板

2．设置模型的初始温度

GUI：Main Menu→Solution→Define Loads→Settings→Uniform Temp，弹出如图 9-15 所

示的“均匀温度”设置面板，“Uniform temperature”设为“20”，单击“OK”按钮。

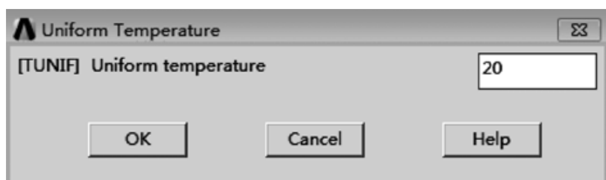


图 9-15 “均匀温度”设置面板

3．定义热边界条件

GUI：Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Thermal→Convection→On Areas，弹出“拾取”对话框，拾取面板 A6、A14、A8、A15、A1、A3、A13、A7、A4 和 A12，单击“OK”按钮，弹出如图 9-16 所示的“在面上施加对流换热系数”设置面板，“Film coefficient”设为“30”，“Bulk temperature”设为“20”，单击“OK”按钮。

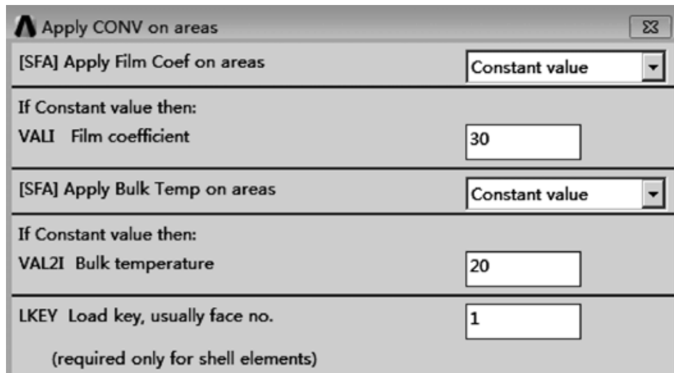


图 9-16 “在面上施加对流换热系数”设置面板

4．杀死焊缝单元

（1）选择焊缝体

GUI：Utility Menu→Select→Entities，弹出如图 9-17 所示的“选取实体”设置面板，设置选取实体类型为“Volumes”，单击“OK”按钮，弹出“拾取”对话框，拾取焊缝体 V2，单击“OK”按钮。

（2）选择关联于焊缝体的单元

GUI：Utility Menu→Select→Entities，弹出如图 9-18 所示的“选取实体”设置面板，设置选取实体类型为“Elements”，选取方式为“Attached to”，关联的实体为“Volumes”，单击“OK”按钮。

（3）杀死焊缝单元

ANSYS 目前暂不支持 GUI 选择全部单元，因此使用以下命令流来杀死全部已经选择的单元：

```
EKILL,ALL
```

（4）选择所有实体

GUI：Utility Menu→Select→Everything。



图 9-17 “选取实体”设置面板

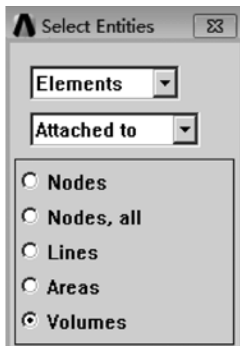


图 9-18 “选取实体”设置面板

5．求解

因为生死单元不支持多载荷步求解，因此只能编制循环语句进行求解：

```
*DO,I,1,80,1
BFDELE,ALL,HGEN        !删除所有生热率载荷
TIME,0.25*I            !设置求解时间
AUTOTS,1               !激活自动时间步
DELTIM,0.25,0.25,0.25,1
KBC,0
!选择单元进行单元生操作
VSEL,ALL
VSEL,S, , ,      2
ESEL,ALL
ESLV,S
EPLOT
NSEL,ALL
NSLV,S,1
NPLOT
NSEL,R,LOC,Z,L/80*(I-1) ,L/80*I
NPLOT
BF,ALL,HGEN,1.8E10 !施加内部生热率
ESLN,R,1
EPLOT
EALIVE,ALL !选择所有生的单元
ALLSEL,ALL
SOLVE
*ENDDO
```

9.6.3 后处理

图 9-19～图 9-24 分别给出了平板填充焊接不同时刻的温度云图，图 9-25～图 9-26 分别给出了不同节点处的温度随时间的变化关系，具体查看方法用户可以参见本章的视频教程。

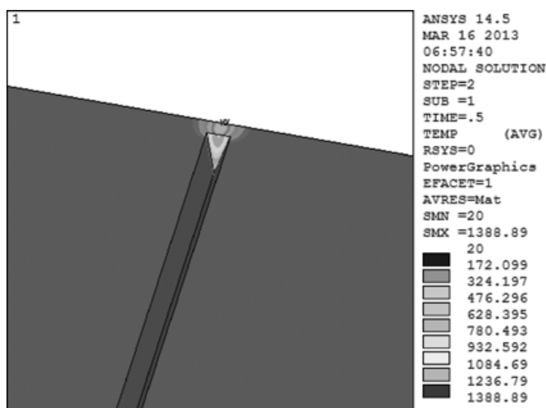


图 9-19 0.5s 时刻的焊接温度云图

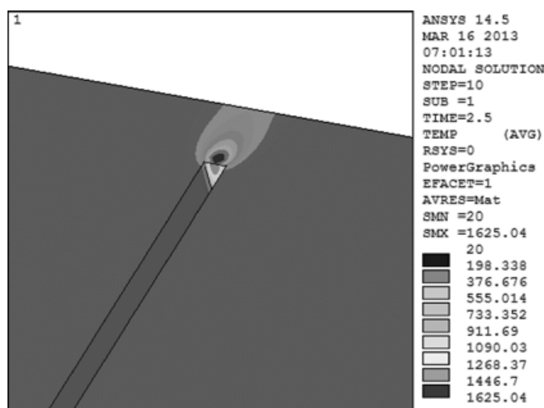


图 9-20 2.5s 时刻的焊接温度云图

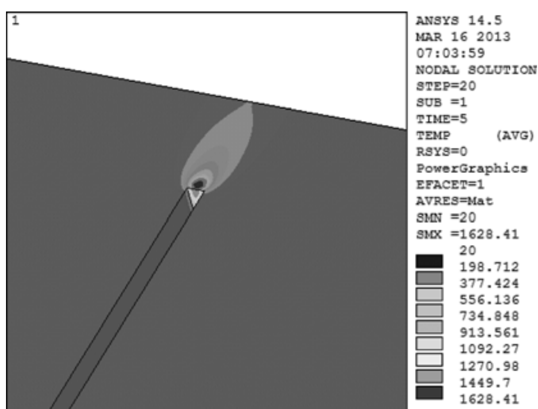


图 9-21 5s 时刻的焊接温度云图

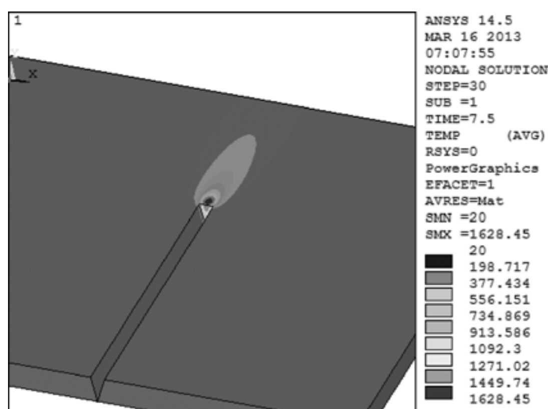


图 9-22 7.5s 时刻的焊接温度云图

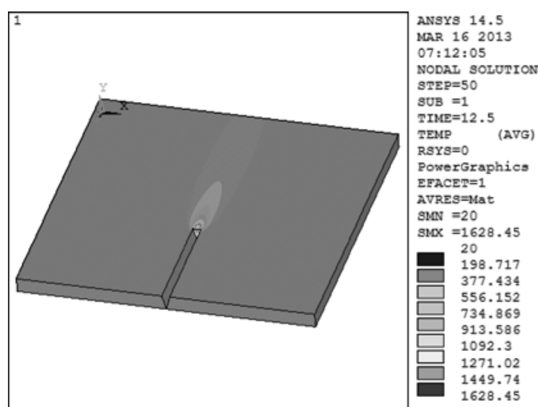


图 9-23 12.5s 时刻的焊接温度云图

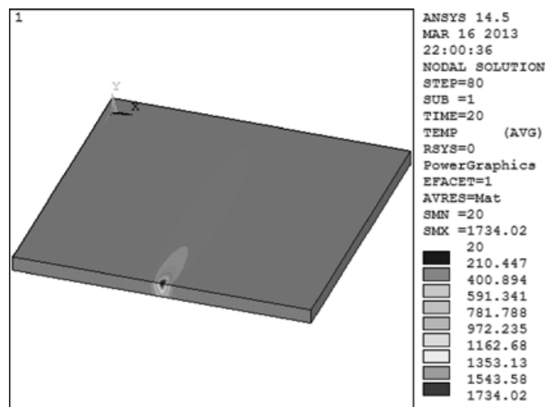


图 9-24 20s 时刻的焊接温度云图



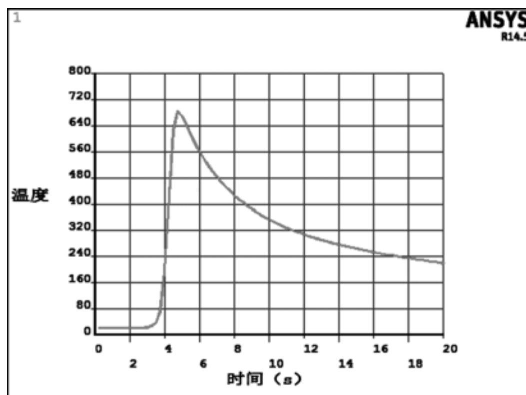


图 9-25　11550 节点处温度与时间的关系

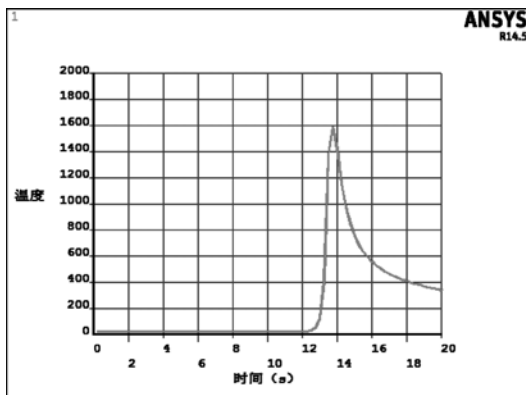


图 9-26　15533 节点处温度与时间的关系

9.7　命令流

```
/FILNAME,Life and death element method,0
/PREP7
!定义参数
W=0.1
H=0.01
L=0.2
SEITA=30
HS=1.8E10
V=0.01
!定义分析单元
ET,1,PLANE77
ET,2,SOLID70
!设置材料参数
MP,DENS,1,7800
MP,KXX,1,43
MP,C,1,400
!建立模型
*AFUN,DEG
K,1,0,0,0
K,2,W,0,0
K,3,2*W,0,0
K,4,2*W,H,0
K,5,W+H/TAN(90-SEITA/2),H,0
K,6,W-H/TAN(90-SEITA/2),H,0
K,7,0,H,0
K,8,0,0,L
A,1,2,6,7
A,2,5,6
A,2,3,4,5,
```



```
L,1,8
!划分网格
!设置线上的单元数量
LESIZE,3, , ,30,10, , , ,1
LESIZE,7, , ,30,10, , , ,1
LESIZE,9, , ,30,0.1, , , ,1
LESIZE,1, , ,30,0.1, , , ,1
LESIZE,6, , ,8,, , , ,1
LESIZE,2, , ,8,, , , ,1
LESIZE,5, , ,8,, , , ,1
TYPE,1
AMESH,ALL
!将平面网格拉伸成体网格
TYPE,     2
EXTOPT,ESIZE,80,0,
EXTOPT,ACLEAR,1
!*
EXTOPT,ATTR,0,0,0
MAT,1
REAL,_Z4
ESYS,0
VDRAG,ALL, , , , , ,10
!进入求解
/SOL
NROPT,FULL, , !使用完全牛顿法求解
ANTYPE,4 !激活瞬态求解
TRNOPT,FULL !使用完全法求解瞬态问题
TUNIF,20,     !设置初始均匀温度
!定义对流换热边界条件
SFA,6,1,CONV,30,20
SFA,14,1,CONV,30,20
SFA,8,1,CONV,30,20
SFA,15,1,CONV,30,20
SFA,1,1,CONV,30,20
SFA,3,1,CONV,30,20
SFA,13,1,CONV,30,20
SFA,7,1,CONV,30,20
SFA,4,1,CONV,30,20
SFA,12,1,CONV,30,20
!杀死焊缝单元
VSEL,ALL
VSEL,S, , ,           2
ESEL,ALL
ESLV,S
EPLOT
EKILL,ALL
```

```
ALLSEL,ALL
!编制循环语句，来实现逐步将杀死的单元进行生操作
*DO,I,1,80,1
BFDELE,ALL,HGEN
TIME,0.25*I
AUTOTS,1
DELTIM,0.25,0.25,0.25,1
KBC,0
VSEL,ALL
VSEL,S, , ,            2
ESEL,ALL
ESLV,S
EPLOT
NSEL,ALL
NSLV,S,1
NPLOT
NSEL,R,LOC,Z,L/80*(I-1) ,L/80*I
NPLOT
BF,ALL,HGEN,1.8E10
ESLN,R,1
EPLOT
EALIVE,ALL
ALLSEL,ALL
SOLVE
*ENDDO
```



第 10 例 轮-轨接触的有限元分析

10.1 实例覆盖的知识点

读者通过学习该实例可以掌握如下 ANSYS 的知识点。

1）瞬态结构动力学分析的步骤。

2）设置双线性等向强化材料模型的方法。

3）实现轮子转动的方法。

4）使用接触向导创建接触对及高级接触功能的方法。

5）设置非线性求解的方法。

6）激活与关闭结构瞬态效应的方法。

7）设置非线性方程迭代次数的方法。

10.2 模型

图 10-1 给出了轮-轨接触的平面图，图中给出了轮-轨接触模型的几何尺寸，图 10-2 给出了轮-轨接触的三维模型，轮子的厚度为 50mm，轨道的宽度为 150mm。

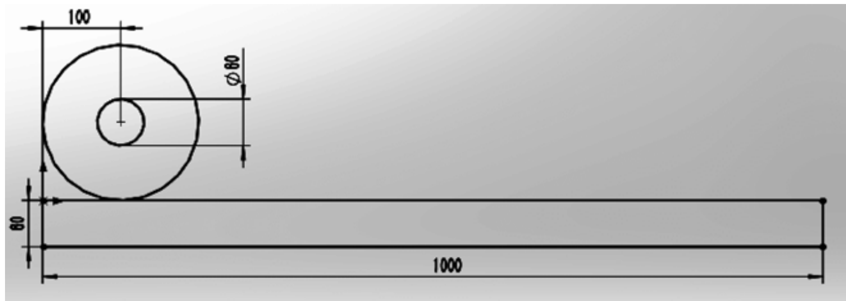


图 10-1 轮-接触的平面图

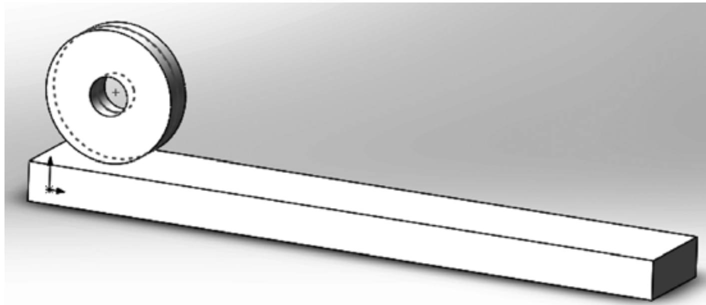


图 10-2 轮-轨接触的三维模型

10.3　单元

本实例选用三维单元 SOLID185 模拟轮-轨模型，使用接触向导完成对轮-轨之间接触的定义。

10.4　材料参数

本实例中轮-轨的材料相同，弹性模量为 2E11Pa，泊松比为 0.3，使用双线性等向强化模型模拟轮-轨的弹塑性应力-应变关系，其中屈服应力为 500E6Pa，切线模量为 0，轮-轨之间的摩擦系数为 0.25。

10.5　边界条件和载荷

完全约束轨道的底面自由度，首先在轮子的中心施加向下的位移 0.00035m，然后再在轮子的中心施加水平位移 0.4m，模拟轮子的在轨道上的转动和平动。

10.6　GUI 操作

10.6.1 前处理

1．定义文件名

GUI：Utility Menu→File→Change Jobname，弹出一个对话框，在输入栏中输入“Wheel-rail contact”，单击“OK”按钮。

2．选择单元

（1）定义单元

GUI：Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add→Edit→Delete，单击“Add”按钮，弹出如图 10-3 所示的“单元类型选择”对话框，在弹出对话框的左边选择“Structural Mass”，在右边选择“Brick 8node 185”单元，单击“Apply”按钮，单击“OK”按钮。

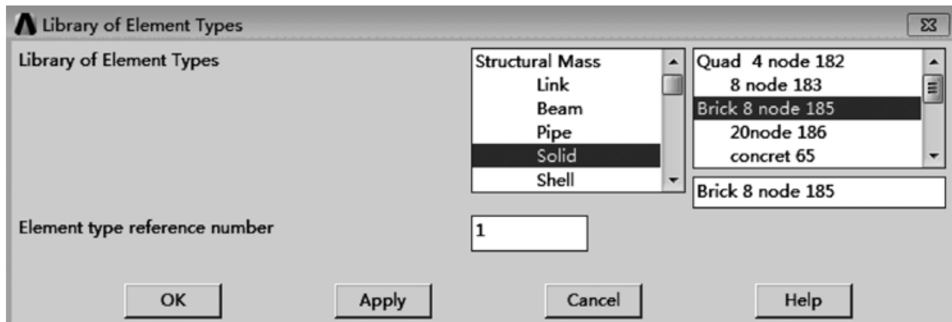


图 10-3　“单元类型选择”对话框

（2）设置单元关键字

在“单元类型”对话框中选择“SOLID185”，然后选择“Options”选项，弹出如图 10-4 所示的“SOLID185 单元关键字”设置面板，设置“Element technology”为“Reduced integration”，单击“OK”按钮，然后单击“Close”按钮关闭对话框。

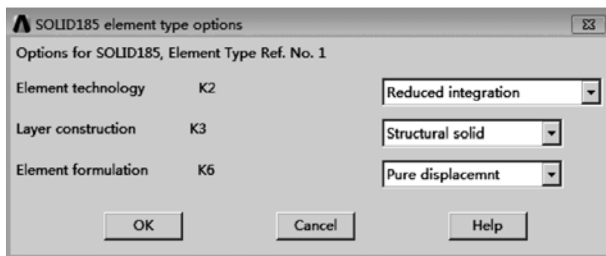


图 10-4 “SOLID185 单元关键字”设置面板

3．定义材料模型

GUI：Main Menu→Preprocessor→Material Props→Material Models，弹出一个对话框，单击 Structural→Liner→Elastic→Isotropic，弹出如图 10-5 所示的“线弹性各向同性材料属性参数”设置面板，输入 EX 为“2E11”，PRXY 为“0.3”，单击“OK”按钮。

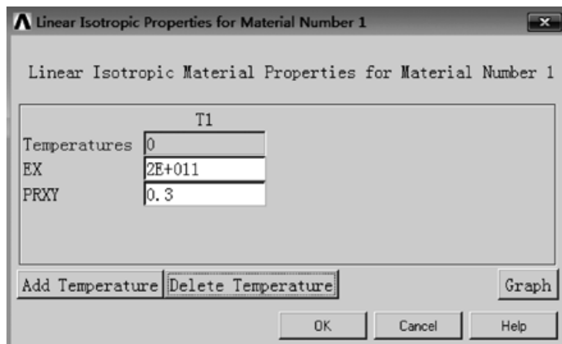


图 10-5 “线弹性各向同性材料属性参数”设置面板

设置材料的应力应变关系为双线性等向强化，单击 Structural→Nonlinear→Inelastic→Rate Independent→Mises Plasticity→Bilinear，弹出如图 10-6 所示的“双线性等向强化模型”设置面板，输入 Yield Stss 为“5E8”，Tang Mod 为“0”，单击“OK”按钮。

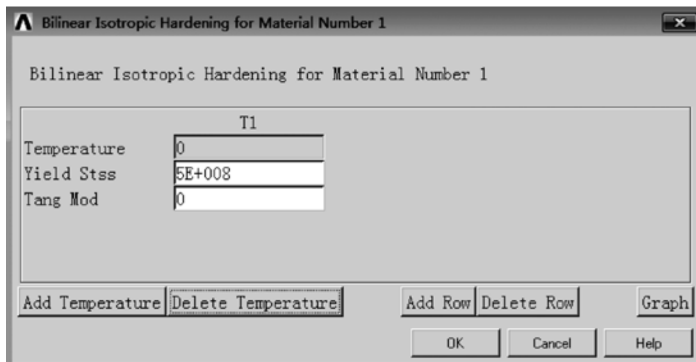


图 10-6 “双线性等向强化模型”设置面板

设置材料的密度，单击 Structural→Density，弹出如图 10-7 所示的“材料密度”设置面板，输入 DENS 为“7800”，单击“OK”按钮。

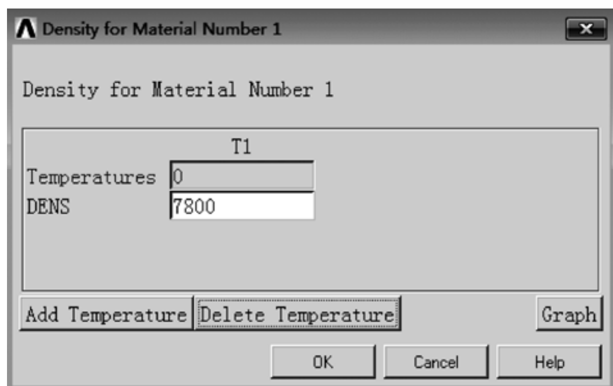


图 10-7 “材料密度”设置面板

4．建立模型

（1）建立长方体

GUI：Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Volumes→Block→By Dimensions，弹出如图 10-8 所示的“通过尺寸创建长方体”设置面板，按照图 10-8 进行输入，单击“OK”按钮。



图 10-8 “通过尺寸创建长方体”设置面板

（2）建立圆柱体

GUI：Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Volumes→Cylinder→Partial Cylinder，弹出如图 10-9 所示的“创建圆柱体参数”设置面板，按照图 10-9 进行输入，单击“OK”按钮。

（3）平移圆柱体

GUI：Main Menu→Preprocessor→Modeling→Move→Modify→Volumes，弹出“拾取”对话框，拾取圆柱体，单击“OK”按钮。

5．划分网格

（1）打开网格划分工具

GUI：Main Menu→Preprocessor→Meshing→MeshTool。

（2）设置总体网格尺寸

选择如图 10-10 所示的“网格划分工具”面板中“尺寸控制”子面板中的“Global”选

项并单击“Set”按钮，弹出如图 10-11 所示的“总体网格尺寸”设置面板。

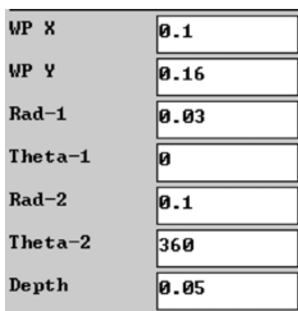


图 10-9 “创建圆柱体参数”设置面板



图 10-10 “网格划分工具面板中尺寸控制”子面板

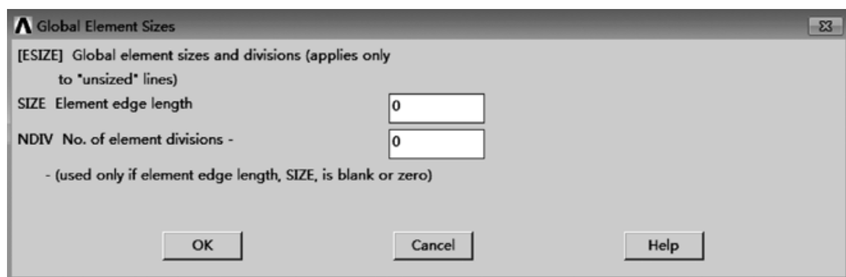


图 10-11 “总体网格尺寸”设置面板

该设置面板中存在两个控制选项，“Element edge length”和单元数量“No. of element divisions”，“Element edge length”设为“0.012”，单击“OK”按钮。

（3）划分网格

选择“网格划分”工具中“Shape”为“Hex/Wedge”，划分方法为“Sweep”，单击“Sweep”按钮，弹出“拾取”对话框，用鼠标拾取体 2、3 和 4，单击“OK”按钮。

6．创建轮-轨系统的接触对

（1）打开接触管理器

单击主菜单中的图标，单开如图 10-12 所示的“接触管理器”面板。

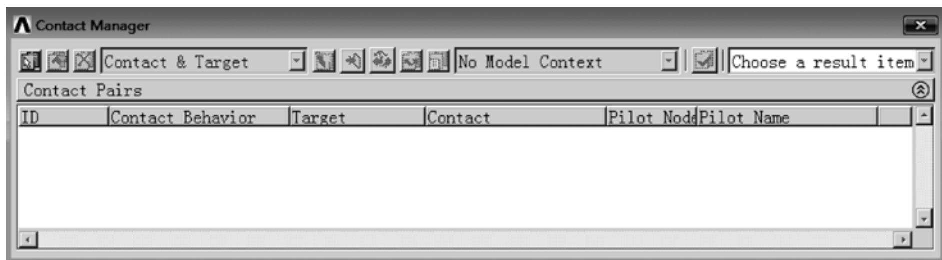


图 10-12 “接触管理器”面板

（2）创建轮子的控制节点接触

单击接触管理器中的，弹出如图 10-13 所示的“目标面及目标单元类型”设置面板，在该面板中“Target Surface”选择“Areas”，“Target Type”选择“Pilot Node Only”，单击

“Next”按钮，弹出图 10-14 所示的“控制节点位置”设置面板，保持默认设置，单击“Next”按钮，弹出图 10-15 所示的“接触面及接触单元类型”设置面板，保持默认设置，单击“Pick Contact”按钮，弹出“拾取”对话框，拾取圆柱体体内孔上的面 A11 和 A12，单击“Apply”按钮，返回图 10-15，单击“Next”按钮，弹出如图 10-16 所示的“目标面自由度”设置面板，“Constraint Surface Type”设为“Rigid constraint”，“Boundary conditions on target”设为“User specified”，单击“Creat”按钮来创建接触对。

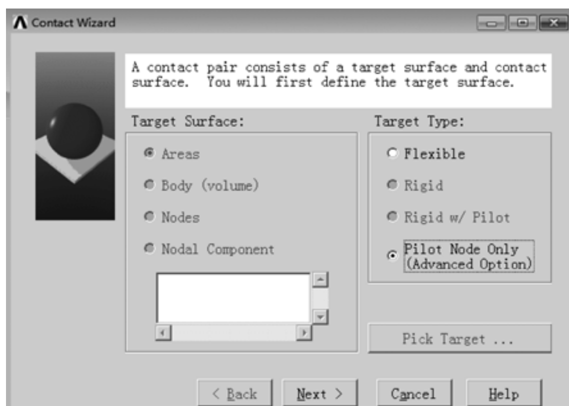


图 10-13 “目标面及目标单元类型”设置面板



图 10-14 “控制节点位置”设置面板

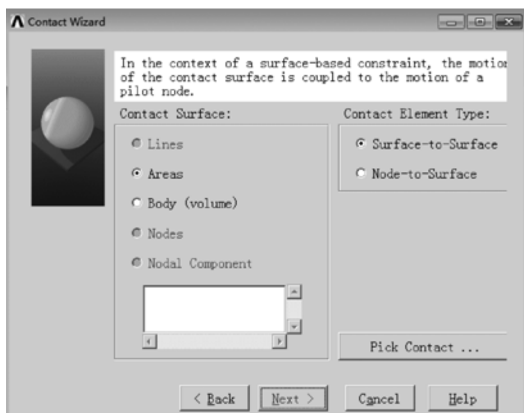


图 10-15 “接触面及接触单元类型”设置面板

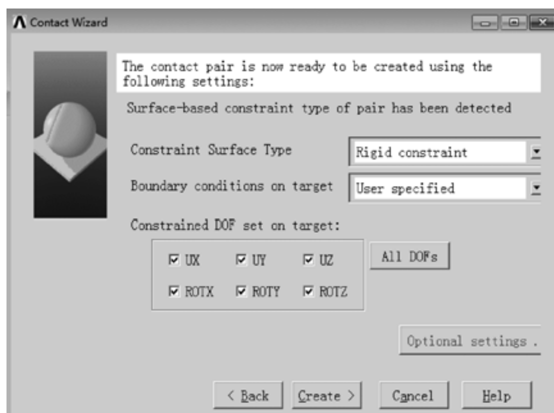


图 10-16 “目标面自由度”设置面板

（3）定义轮-轨之间的接触对

单击接触管理器中的，弹出如图 10-13 所示的“目标面及目标单元类型”设置面板，在该面板中“Target Surface”选择“Areas”，“Target Type”选择“Flexible”，单击“Pick Target”按钮，弹出“拾取”对话框，拾取面 A9 和 A10；单击“Apply”按钮，然后单击图 10-13 所示的“Next”按钮，弹出图 10-15 所示的“接触面及接触单元类型”设置面板，在该面板中“Contact Surface”选择“Areas”，“Contact Element Type”选择“Surface-to-Surface”，单击“Pick Contact”按钮，拾取面 A4；单击“Apply”按钮，单击图 10-15 中的“Next”按钮，弹出图 10-17 所示的“创建接触对”面板，单击“Optional settings”，弹出如图 10-18 所示的“接触对属性”设置面板，“Friction Coefficient”设为“0.25”，返回如

图 10-17 所示“创建接触对”面板，单击“Creat 按钮”来创建接触对。

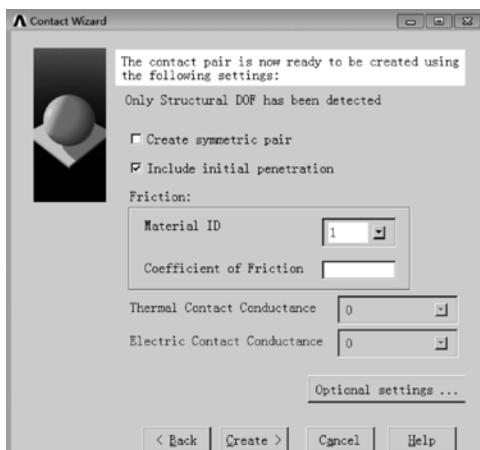


图 10-17 “创建接触对”面板

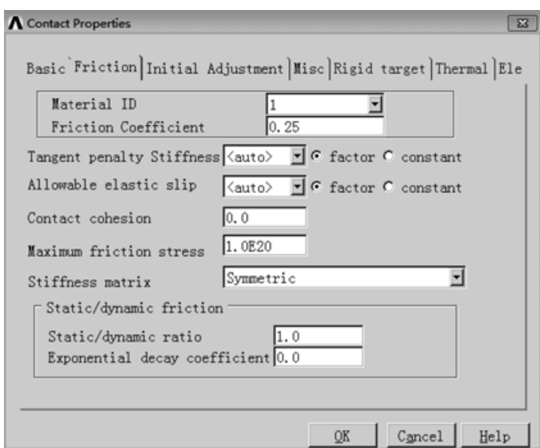


图 10-18 “接触对属性”设置面板

10.6.2 求解

1．设置分析类型

（1）激活瞬态分析

GUI：Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis，弹出如图 10-19 所示的“分析类型”设置面板，选择“Transient”选项，单击“OK”按钮。

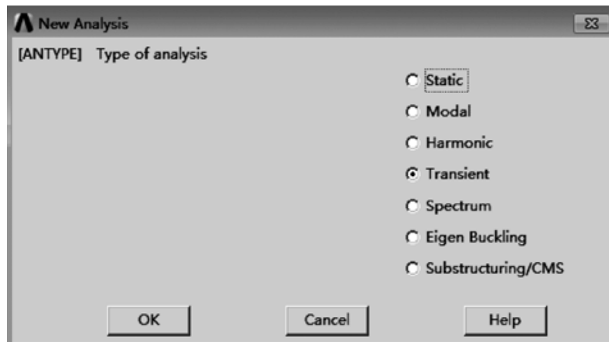


图 10-19 “分析类型”设置面板

（2）设置分析选项

GUI：Main Menu→Preprocessor→Loads→Analysis Type→Analysis Options，弹出如图 10-20 所示的“瞬态分析选项”设置面板，勾选“Large deform effects”复选框，激活大变形分析，其他设置保存默认设置，单击“OK”按钮。

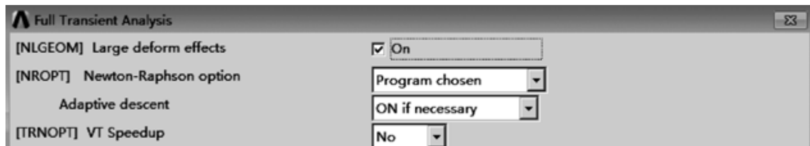


图 10-20 “瞬态分析选项”设置面板

（3）设置方程求解器

GUI：Main Menu→Solution→Analysis Type→Sol'n Controls→Sol'n Options，弹出如图 10-21 所示的“求解选项”设置面板，“Equation Solvers”选择“Sparse direct”选项，单击“OK”按钮。

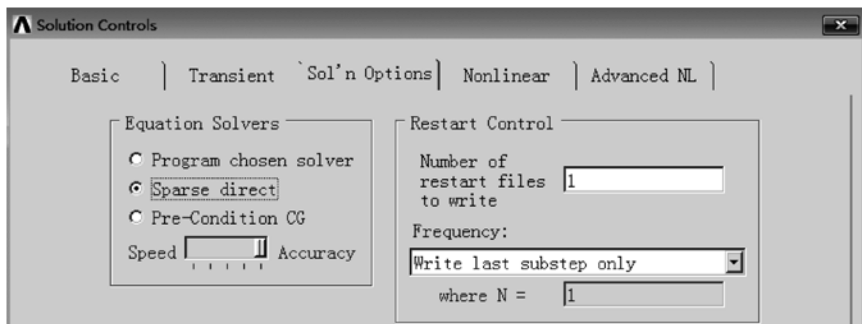


图 10-21 “求解选项”设置面板

2．定义边界条件

（1）完全约束轨道的底面位移

GUI：Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Areas，弹出“拾取”对话框，拾取面 A3，单击“OK”按钮，弹出如图 10-22 所示的“在面上施加位移约束”设置面板，“DOFs to be constrained”选择“ALL DOF”，单击“OK”按钮。

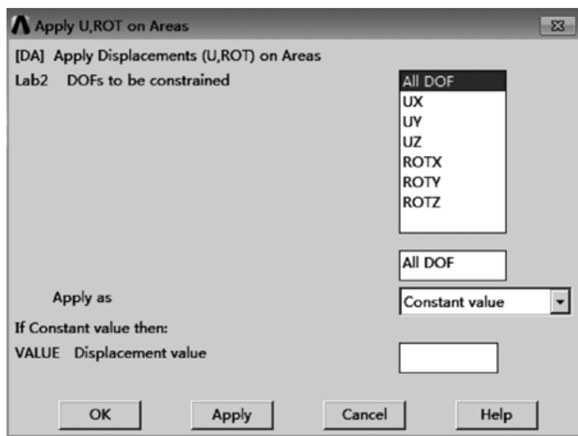


图 10-22 “在面上施加位移约束”设置面板

（2）完全约束控制节点的自由度

GUI：Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Nodes，弹出“拾取”对话框，拾取控制节点 8881，单击“OK”按钮，弹出如图 10-23 所示的“在节点上施加位移约束”设置面板，选择约束类型为“ALL DOF”，单击“OK”按钮。

（3）在控制节点上施加向下位移 0.00039m

GUI：Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Nodes，弹出“拾取”对话框，拾取控制节点 8881，单击“OK”按钮，弹出如图 10-23 所示的“在节点

上施加位移约束”设置面板，选择约束类型为“UY”，输入位移值为“-0.00039”，单击“OK”按钮。

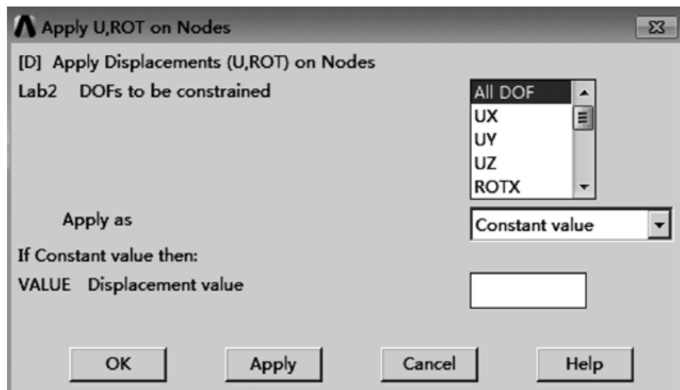


图 10-23 “在节点上施加位移约束”设置面板

3．定义载荷步选项

（1）设置输出控制

GUI：Main Menu→Solution→Load Step Opts→Output Ctrls→DB→Results File，在弹出的“计算结果输出”控制面板选择“Every subsetp”，单击“OK”按钮。

（2）设置非线性求解控制

GUI：Main Menu→Solution→Load Step Opts→Solution Ctrl，弹出如图 10-24 所示的“非线性求解控制”设置面板，按照图中进行设置，单击“OK”按钮，弹出如图 10-25 所示的“基于接触状态时间预测”设置面板，勾选“ON”，单击“OK”按钮。

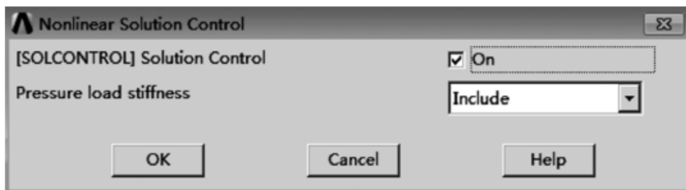


图 10-24 “非线性求解控制”设置面板

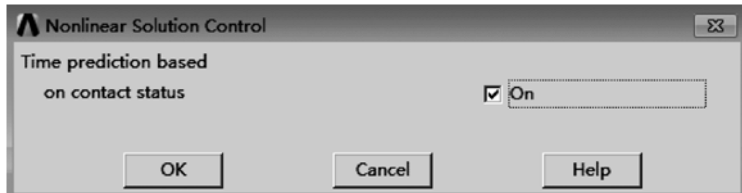


图 10-25 “基于接触状态时间预测”设置面板

（3）设置计算时间和子步

GUI：Main Menu→Solution→Load Step Opts→Time→Frequenc→Time→Time Step，弹出如图 10-26 所示的“时间和子步选项”设置面板，“Time at end of load step”设为“1E-3”，“Number of substeps”设为“1”，“Maximum no. of substeps”设为“1”，“Minimum no.

of substeps”设为“1”，其他保持默认设置，单击“OK”按钮。

（4）关闭时间积分

GUI：Main Menu→Solution→Load Step Opts→Time/Frequenc→Time Integration→Amplitude Decay，弹出如图 10-27 所示的“时间积分”控制面板，保持默认设置，单击“OK”按钮。

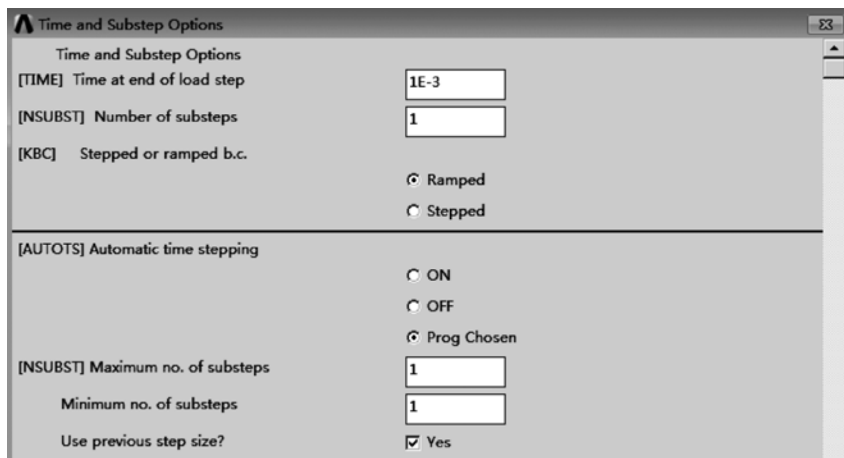


图 10-26 “时间和子步选项”设置面板

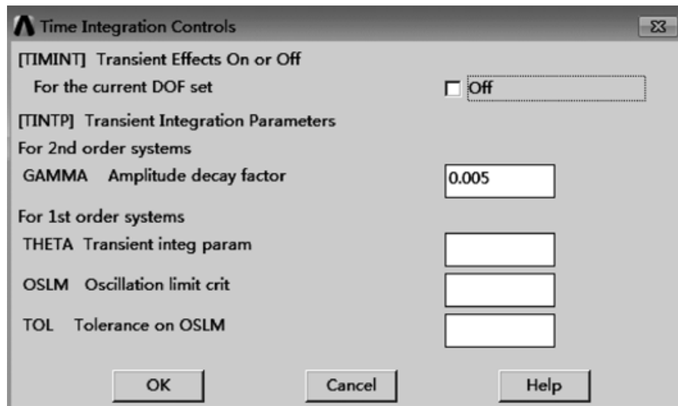


图 10-27 “时间积分”控制面板

（5）设置非线性方程组迭代次数

GUI：Main Menu→Solution→Load Step Opts→Nonlinear→Equilibrium Iter，弹出如图 10-28 所示的“非线性方程组迭代次数”设置面板，“No. of equilibrium iter”设为“40”，单击“OK”按钮。

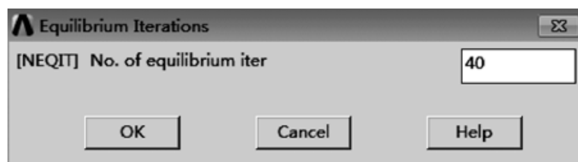


图 10-28 “非线性方程组迭代次数”设置面板

4．第一次求解

GUI：Main Menu→Solution→Solve→Current LS，弹出“求解提示”对话框，单击“OK”按钮。

5．删除控制节点位移约束

GUI：Main Menu→Solution→Define Loads→Delete→Structural→Displacement→On Nodes，弹出“拾取”对话框，拾取控制节点 8881，单击“OK”按钮，弹出如图 10-29 所示的“删除节点约束”设置面板，选择删除自由度“UX”，单击“Apply”按钮，继续拾取控制节点 8881，单击“OK”按钮，弹出如图 10-29 所示的“删除节点约束”设置面板，选择删除自由度“ROTZ”，单击“OK”按钮。

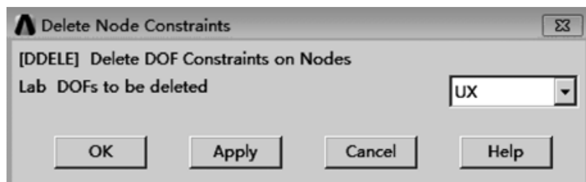


图 10-29 “删除节点约束”设置面板

6．设置控制节点的平动位移

GUI：Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Nodes，弹出“拾取”对话框，拾取控制节点 8881，单击“OK”按钮，弹出如图 10-23 所示的“在节点上施加位移约束”设置面板，选择约束类型为“UX”，输入位移值为“0.6”，单击“OK”按钮。

7．定义载荷步选项

（1）打开时间积分

GUI：Main Menu→Solution→Load Step Opts→Time→Frequenc→Time Integration→Amplitude Decay，弹出如图 10-27 所示的“时间积分”控制面板，勾选“ON”，单击“OK”按钮。

（2）设置计算时间和子步

GUI：Main Menu→Solution→Load Step Opts→Time→Frequenc→Time→Time Step，弹出如图 10-26 所示的“时间和子步选项”设置面板，“Time at end of load step”设为“2.5”，“Number of substeps”设为“200”，“Maximum no. of substeps”设为“225”，“Minimum no of substeps”设为“100”，其他保持默认设置，单击“OK”按钮。

8．第二次求解

GUI：Main Menu→Solution→Solve→Current LS，弹出“求解提示”对话框，单击“OK”按钮。

10.6.3 后处理

图 10-30～图 10-35 分别给出了轮-轨接触不同时刻的等效应力云图，图 10-36～图 10-39 分别给出了轮-轨接触不同时刻的接触压力云图，图 10-40～图 10-43 分别给出了节点处转动位移、平动位移、等效应力和等效塑性应变随时间的关系。



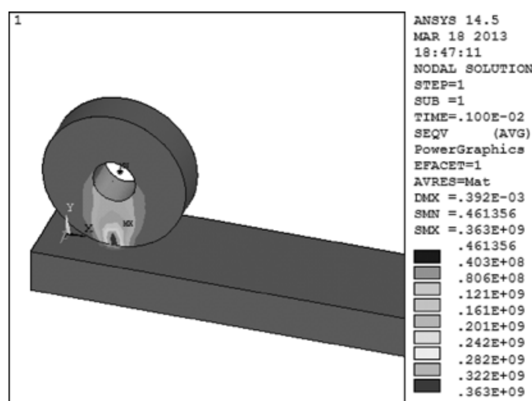


图 10-30　1E-3s 时刻的等效应力云图

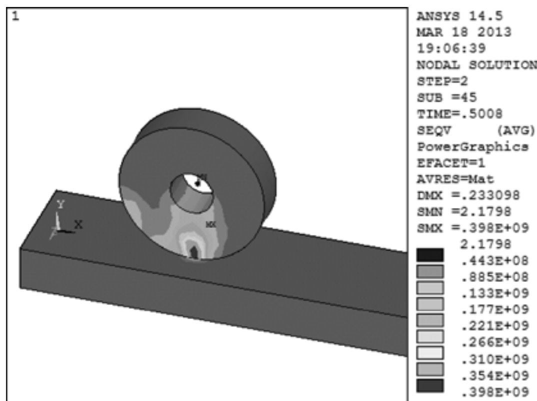


图 10-31　0.5008s 时刻的等效应力云图

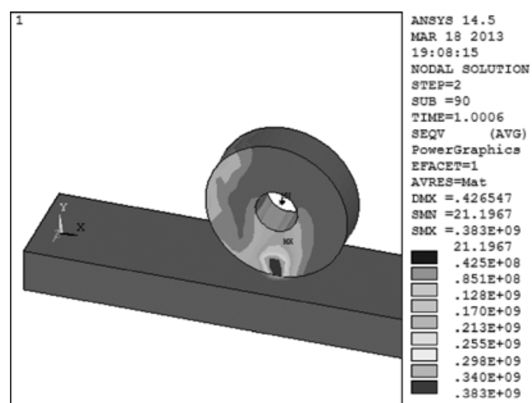


图 10-32　1.0006s 时刻的等效应力云图

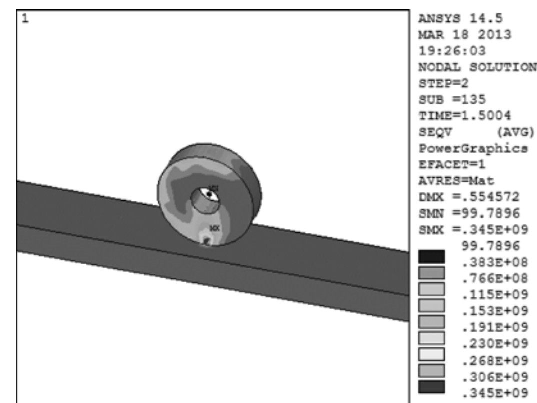


图 10-33　1.5004s 时刻的等效应力云图

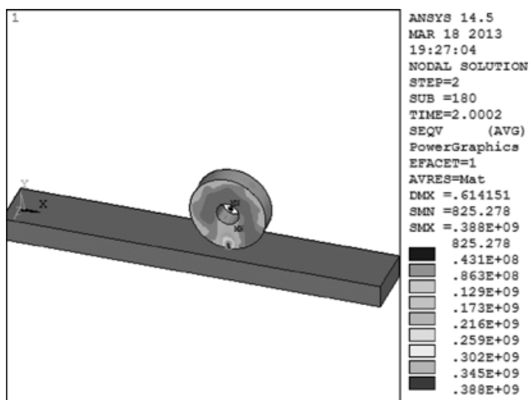


图 10-34　2.0002s 时刻的等效应力云图

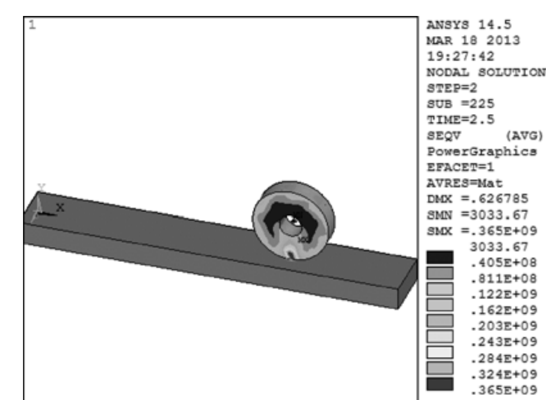


图 10-35　2.5s 时刻的等效应力云图

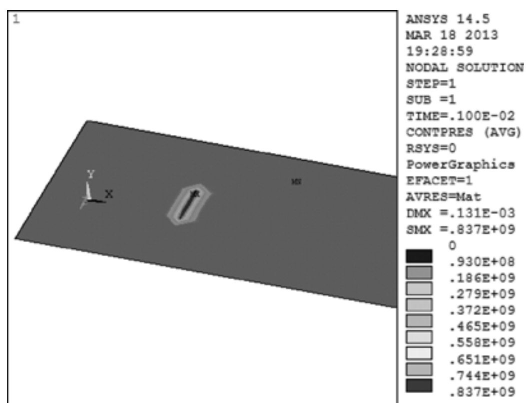


图 10-36　1E-3s 时刻的接触压力云图

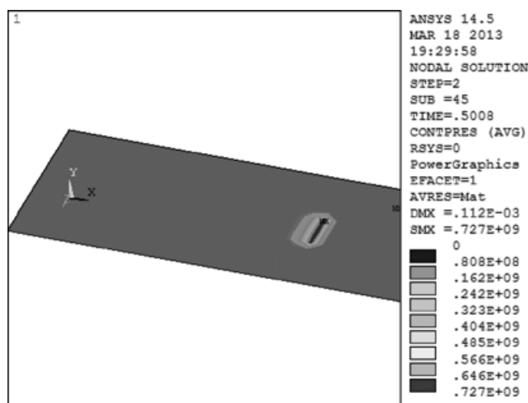


图 10-37　0.5008s 时刻的接触压力云图

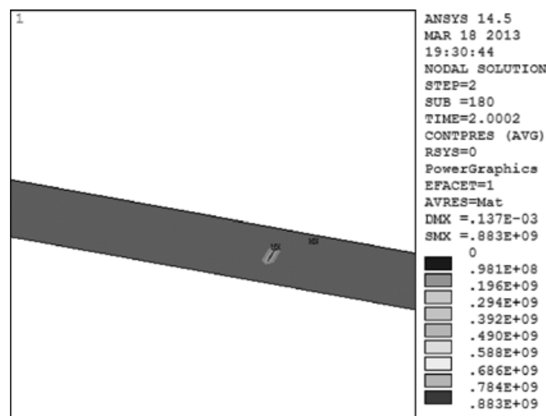


图 10-38　2.0002s 时刻的接触压力云图

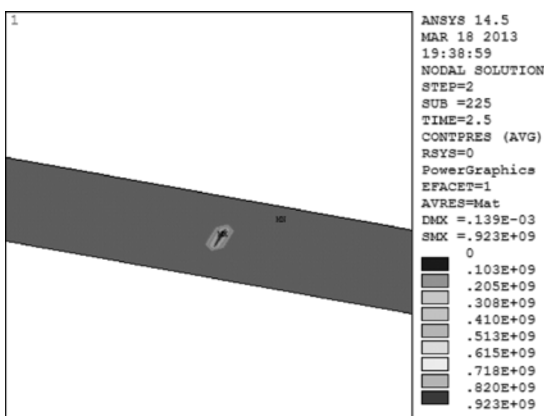


图 10-39　2.5s 时刻的接触压力云图

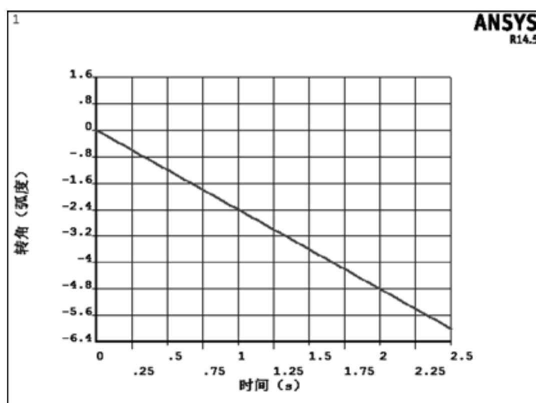


图 10-40　8881 节点处转动位移与时间的关系

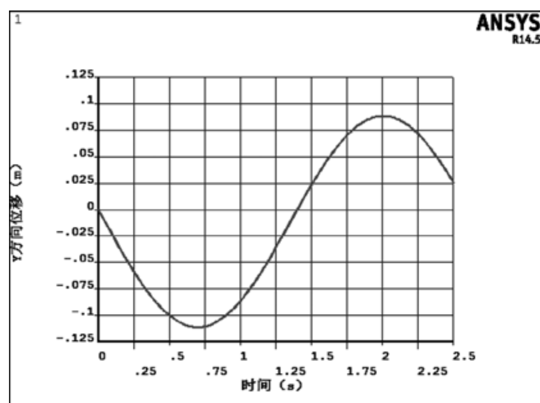


图 10-41　3866 节点 Y 方向位移与时间的关系

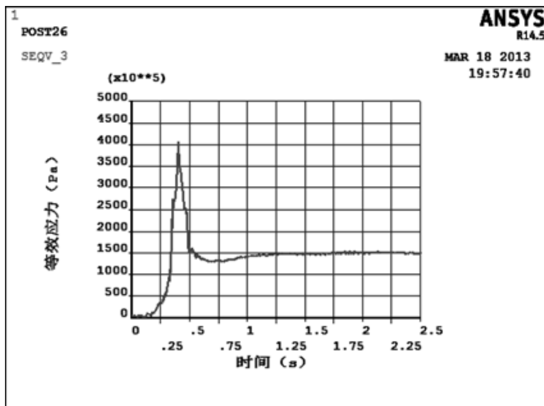


图 10-42　4006 节点处等效应力与时间的关系

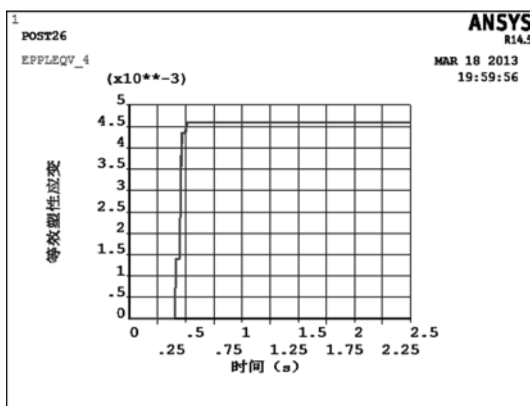


图 10-43　4007 节点处等效应力与时间的关系

10.7　命令流

```
/FILNAME,Whee-rail contact,0
/PREP7
!定义单元
ET,1,SOLID185
KEYOPT,1,2,1
!定义材料参数
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,1,,2E11
MPDATA,PRXY,1,,0.3
MP,DENS,1,7800
TB,BISO,1,1,2,
TBTEMP,0
TBDATA,,500e6,0,,,,
!建立模型
BLOCK,0,1,0,0.06,0,0.15,
CYL4,0.1,0.16,0.03,0,0.1,360,0.05
VGEN, ,2, , , , ,0.05, , ,1
!划分网格
ESIZE,0.012
VSWEEP,ALL
!定义接触对
!创建接触对的方法用户可以参见本章的视频教程
!进入求解
/SOL
ANTYPE,4   !定义分析类型
TRNOPT,FULL     !使用完全法进行瞬态动力学分析
NLGEOM,1   !激活大变形分析
EQSLV,SPAR      !设置求解器类型
```

```
!定义边界条件
DA,3,ALL,
D,8881, , , , , ,ALL, , , , ,
D,8881, ,-0.00039, , , ,UY, , , , ,
!设置计算结果的输出控制
OUTRES,ALL,ALL,
!打开接触优化控制
SOLCONTROL,ON,1,NOPL
!关闭结构瞬态效应
TIMINT,0
TINTP,0.005, , , , , ,
TIME,1E-3
AUTOTS,-1
NSUBST,1,1,1,1
KBC,0
NEQIT,40, !设置每一个子步的最大迭代次数
SOLVE
!删除平动和转动位移约束
DDELE,8881,UX
DDELE,8881,ROTZ
!施加一个新的转动位移约束
D,8881, ,0.6, , , ,UX, , , ,
TIMINT,1 !激活结构瞬态效应
TIME,2.5
NSUBST,200,225 ,100 ,1
AUTOTS,1
SOLVE
```



第 11 例　圆柱体挤压成型非线性有限元分析

11.1　实例覆盖的知识点

读者通过学习该实例可以掌握如下 ANSYS 的知识点。

1）结构静力学分析的步骤。

2）设置双线性等向强化材料模型的方法。

3）使用接触向导创建带控制节点的刚-柔接触。

4）设置大变形的方法。

5）网格划分控制方法。

11.2　模型

图 11-1 给出了圆柱体挤压成型的轴对称模型，模型的尺寸如图 11-1 所示，单位为 mm。

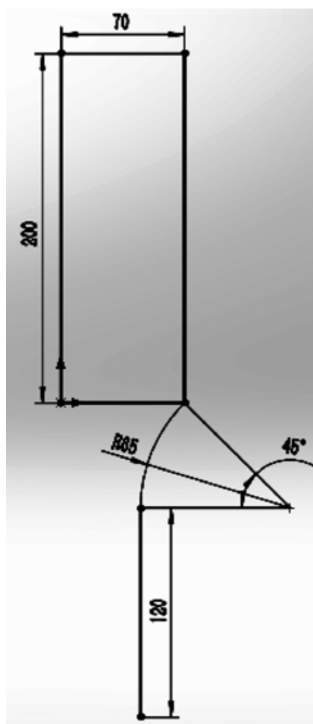


图 11-1　圆柱体挤压成型的轴对称模型

11.3 单元

本实例选用平面 PLANE182 单元模拟圆柱体，并设置其单元关键字为轴对称单元行为，使用接触向导完成模具和工件之间的刚-柔接触。



11.4 材料参数

工件的弹性模量为 2E11Pa，泊松比为 0.3，工件的弹塑性应力-应变关系符合双线性等向强化模型，其中屈服应力为 500MPa，切线模量为 0，这样设置参数对应于理想弹塑性模型，工件与刚性模具之间的摩擦系数为 0.1。

11.5 边界条件和载荷

完全约束刚性模具，在圆柱体工件的上表面施加向下的位移 0.2m，约束圆柱体工件轴对称中心线上的 X 方向位移。

11.6 GUI 操作

11.6.1 前处理

1．定义文件名

GUI：Utility Menu→File→Change Jobname，弹出一个对话框，在输入栏中输入“Cylinder extrusion”，单击“OK”按钮。

2．选择单元

（1）定义单元

GUI：Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete，单击“Add”按钮，弹出如图 11-2 所示的“单元类型选择”对话框，在弹出对话框的左边选择“Structural Mass”，在右边选择“Quad 4 node 182”单元，单击“OK”按钮。

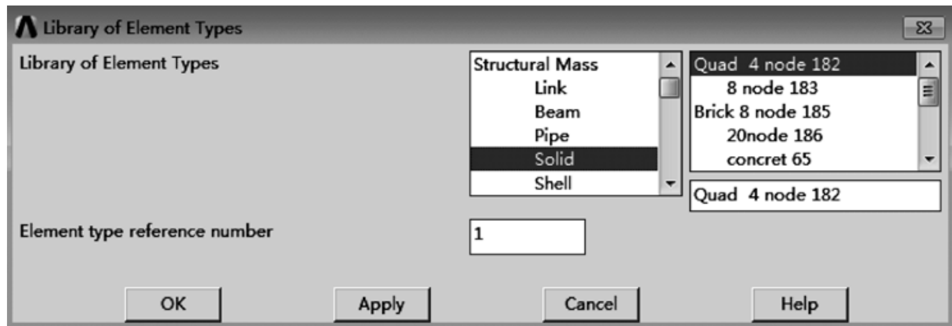


图 11-2 “单元类型选择”对话框

（2）设置单元关键字

在“单元类型”对话框中选择“PLANE182”，然后选择“Options”选项，弹出如图 11-3 所示的“PLANE182 单元关键字”设置面板，“Element behavior”选择“Axisymmetric”，单击“OK”按钮；返回单元类型界面，然后单击“Close”按钮关闭对话框。

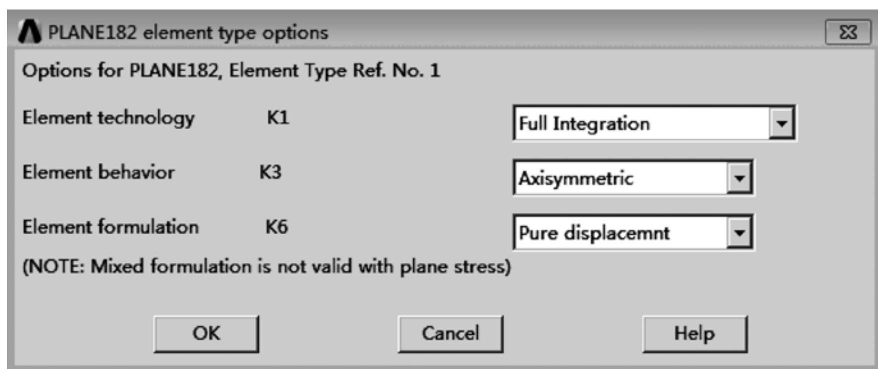


图 11-3 “PLANE182 单元关键字”设置面板

3．定义材料模型

GUI：Main Menu→Preprocessor→Material Props→Material Models，弹出一个对话框，单击 Structural→Liner→Elastic→Isotropic，弹出如图 11-4 所示的“线弹性各向同性材料属性参数”设置面板，输入 EX 为“2E11”，PRXY 为“0.3”，单击“OK”按钮，

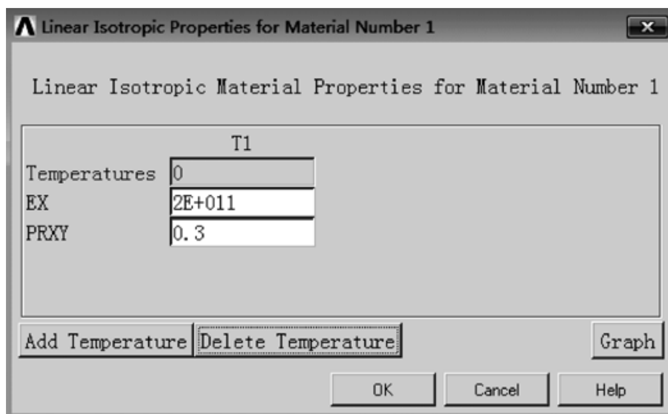


图 11-4 “线弹性各向同性材料属性参数”设置面板

设置材料的应力应变关系为双线性等向强化，单击 Structural→Nonlinear→Inelastic→Rate Independent→Mises Plasticity→Bilinear，弹出如图 11-5 所示的“双线性等向强化模型”设置面板，输入 Yield Stss 为“5E8”，Tang Mod 为“0”，单击“OK”按钮。

4．建立模型

（1）设置角度单位

GUI：Utility Menu→Parameters→Angular Units，弹出如图 11-6 所示的“角度单位”设置面板，“Units for angular”选择“Degrees DEG”，单击“OK”按钮。

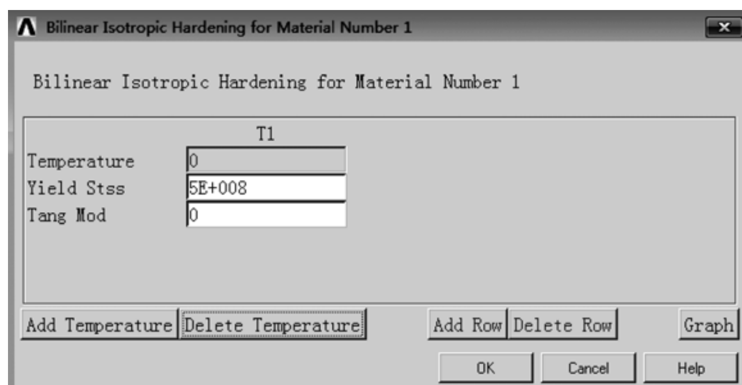


图 11-5 “双线性等向强化模型”设置面板

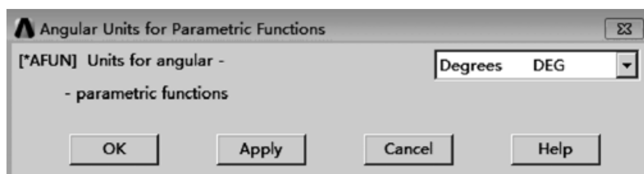


图 11-6 “角度单位”设置面板

（2）定义关键点

GUI：Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Keypoints→In Active CS，弹出如图 11-7 所示的“在激活坐标系中定义关键点”设置面板，输入关键点号 NPT=1，对应的坐标为 X=0，Y=0；单击“Apply”按钮，继续输入关键点 NPT=2，对应的坐标为 X=0.07，Y=0；单击“Apply”按钮，继续输入关键点 NPT=3，对应的坐标为 X=0.02，Y=0.2；单击“Apply”按钮，继续输入关键点号 NPT=4，对应的坐标为 X=0，Y=0.2；单击“Apply”按钮，继续输入关键点 NPT=5，对应的坐标为 X=0.05，Y=0；单击“Apply”按钮，继续输入关键点 NPT=6，对应的坐标为 X=0.07，Y=0.2；单击“Apply”按钮，继续输入关键点为 NPT=7，对应的坐标为 X=0.07+0.085*COS(45)−0.085*COS(22.5)，Y=−(0.085*SIN(45)−0.085*SIN(22.5))；单击“Apply”按钮，继续输入关键点为 NPT=8，对应的坐标为 X=0.07−0.085+0.085*COS(45)，Y=−0.085*SIN(45)；单击“Apply”按钮，继续输入关键点为 NPT=9，对应的坐标为 X=0.07−0.085+0.085*COS(45)，Y=−0.085*SIN(45)−0.12，单击“OK”按钮。

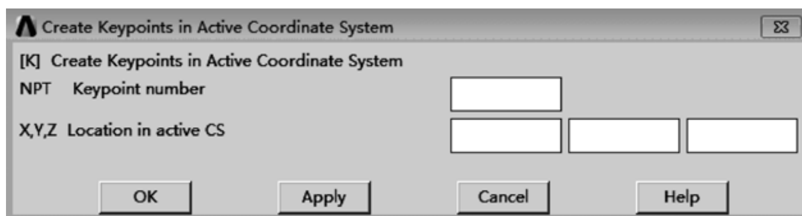


图 11-7 “在激活坐标系中定义关键点”设置面板

（3）定义样条曲线

GUI：Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Lines→Splines→Spline thru KPs，弹出“拾取”对话框，拾取关键点 5、7 和 8，单击“OK”按钮。

（4）定义直线

GUI：Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Lines→Lines→In Active Coord，弹出“拾取”对话框，拾取关键点 8 和 9，单击“Apply”按钮，继续拾取关键点 5 和 6，单击“OK”按钮。

（5）定义面

GUI：Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Arbitrary→Through KPs，弹出“拾取”对话框，拾取关键点 1、2、3 和 4，单击“OK”按钮。

5．划分网格

（1）打开网格划分工具

GUI：Main Menu→Preprocessor→Meshing→MeshTool。

（2）设置总体网格尺寸

选择如图 11-8 所示的“网格划分”工具面板中“尺寸控制”子面板中的“Global”选项并单击“Set”按钮，弹出如图 11-9 所示的“总体网格尺寸”设置面板。



图 11-8 “网格划分工具面板中尺寸控制”子面板

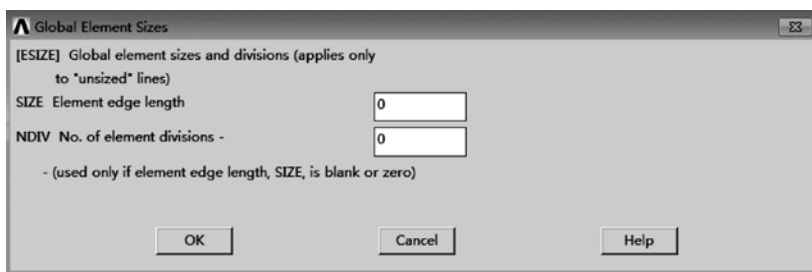


图 11-9 “总体网格尺寸”设置面板

该设置面板中存在两个控制选项，“Element edge length”和“No. of element divisions”，“Element edge length”设为“0.005”，单击“OK”按钮。

（3）划分网格

单击“网格划分”工具面板上的“Mesh”按钮，弹出“拾取”对话框，单击“Pick All”按钮。

6．创建模具与工件之间的刚-柔接触

（1）打开接触管理器

单击主菜单中的图标，打开如图 11-10 所示的“接触管理器”面板。

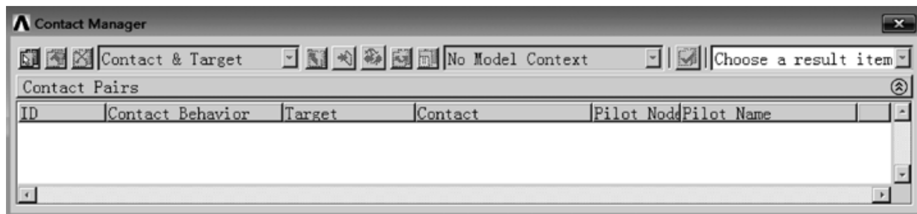


图 11-10 “接触管理器”面板

（2）创建模具与工件之间的刚-柔接触

单击接触管理器中的，弹出如图 11-11 所示的“目标面及目标单元类型”设置面板，

在该面板中“Target Surface”选择“Lines”，“Target Type”选择“Rigid w/Pilot”，单击“Pick Target”按钮，弹出“拾取”对话框，拾取线 L1、L2 和 L3，单击“OK”按钮，返回图 11-11 所示的面板，单击“Next”按钮，弹出图 11-12 所示的“控制节点位置”设置面板，设置拾取存在的自由关键点，单击“Pick Entity”按钮，弹出“拾取”对话框，拾取关键点 K9，单击“OK”按钮，返回图 11-12，单击“Next”按钮，弹出如图 11-13 所示的“接触面及接触单元类型”设置面板，“Contact Surface”选择“Lines”，“Contact Element Type”选择“Surface-to-Surface”，单击“Pick Contact”按钮，弹出“拾取”对话框，拾取线 L4 和 L5，单击“OK”按钮，返回图 11-13，单击“Next”按钮，弹出如图 11-14 所示的“创建接触对”设置面板，“Coefficient of Friction”设为“0.1”，单击“Creat”按钮，创建接触对，检查发现线 L3 的目标单元法向需要倒置，单击“Flip Tartet Normals”按钮，弹出“拾取”对话框，拾取线 L3，单击“OK”按钮，单击“Finish”按钮。



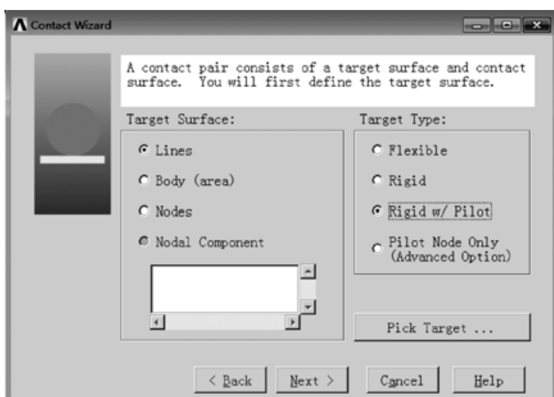


图 11-11 “目标面及目标单元类型”设置面板

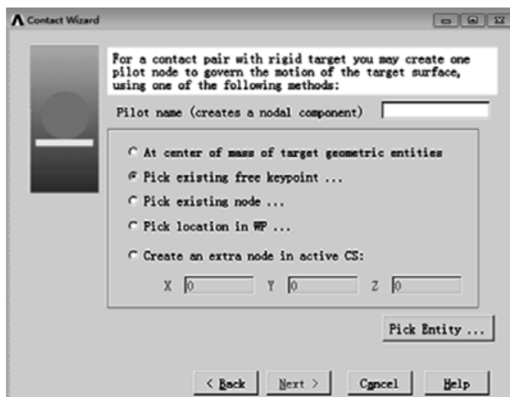


图 11-12 “控制节点位置”设置面板

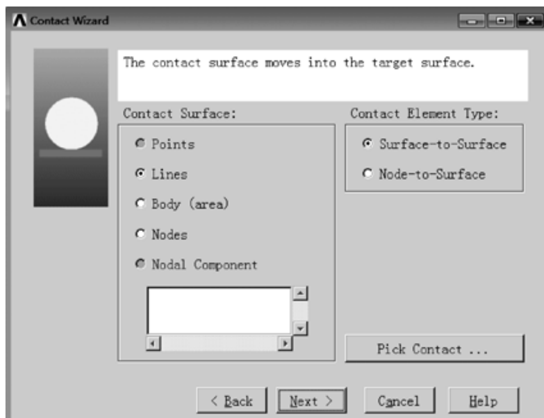


图 11-13 “接触面及接触单元类型”设置面板

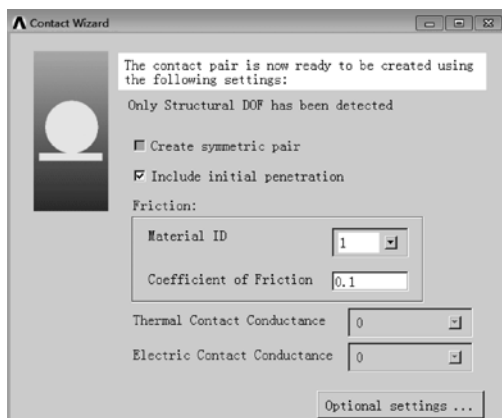


图 11-14 “创建接触对”设置面板

11.6.2 求解

1. 设置分析类型

（1）激活静力学分析

GUI：Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis，弹出如图 11-15 所示的“分

析类型”设置面板，选择“Static”，单击“OK”按钮。

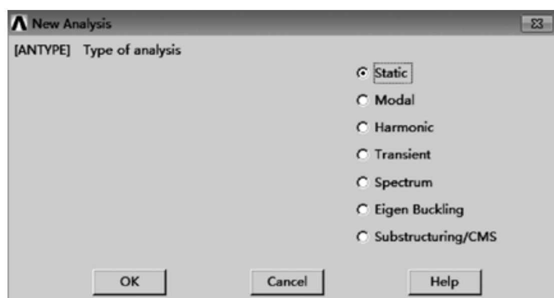


图 11-15 “分析类型”设置面板

（2）设置分析选项

GUI：Main Menu→Preprocessor→Loads→Analysis Type→Analysis Options，弹出如图 11-16 所示的“静态分析选项”设置面板，勾选“Large deform effects”复选框，激活大变形分析，其他设置保存默认设置，单击“OK”按钮。

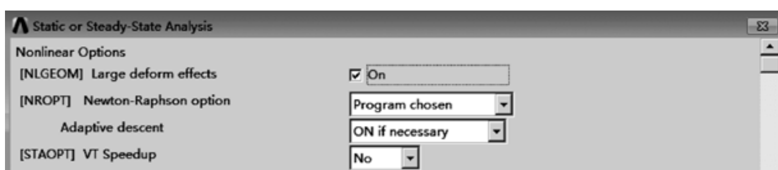


图 11-16 “静态分析选项”设置面板

2．定义边界条件

（1）约束轴对称中心线 X 方向位移

GUI：Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Lines，弹出“拾取”对话框，拾取线 L7，单击“OK”按钮，弹出如图 11-17 所示的“在线上施加位移约束”设置面板，选择约束的自由度类型为“UX”，单击“OK”按钮。

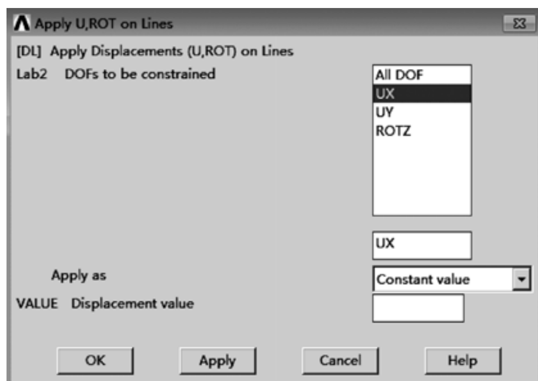


图 11-17 “在线上施加位移约束”设置面板

（2）完全约束控制节点

GUI：Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Nodes，弹出“拾取”对话框，输入控制节点“645”，单击“OK”按钮，弹出如图 11-18 所

示的“在节点上施加位移约束”设置面板，“DOFs to be constrained”选择“ALL DOF”，单击“OK”按钮。

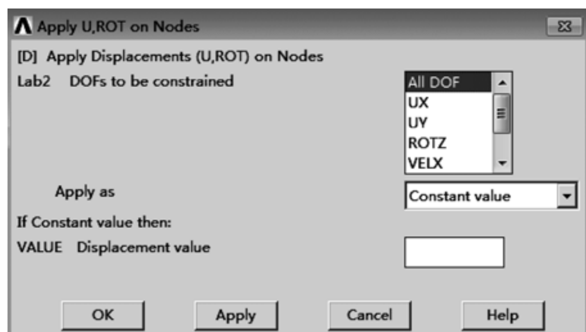


图 11-18 “在节点上施加位移约束”设置面板

（3）在工件的上表面施加 0.2m 的 Y 方向位移约束

GUI：Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Lines，弹出“拾取”对话框，拾取线 L6，单击“OK”按钮，弹出如图 11-17 所示的“在线上施加位移约束”设置面板，选择约束的自由度类型为“UY”，“Dispalcement value”设为“-0.2”，单击“OK”按钮。

3．定义载荷步选项

（1）设置输出控制

GUI：Main Menu→Solution→Load Step Opts→Output Ctrls→DB/Results File，在弹出的“计算结果输出”控制面板选择“Every substep”，单击“OK”按钮。

（2）设置计算时间和子步

GUI：Main Menu→Solution→Load Step Opts→Time→Frequenc→Time→Time Step ，弹出如图 11-19 所示的“时间和子步选项”设置面板，“Time at end of load step”设为“1”，“Time step size”设为“300”，其他保持默认设置，单击“OK”按钮。

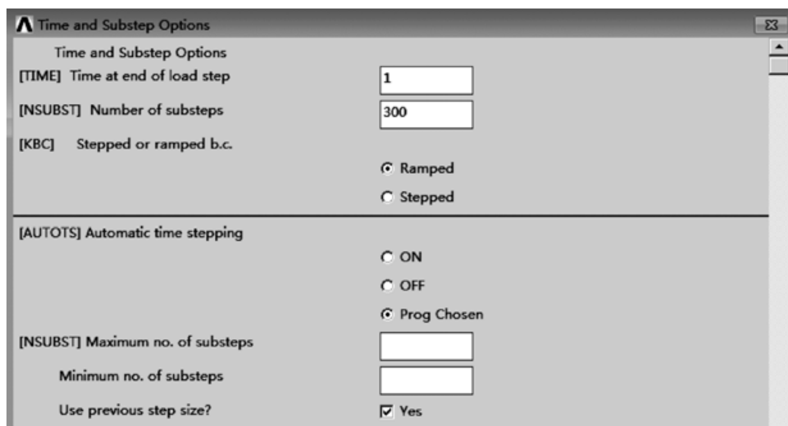


图 11-19 “时间和子步选项”设置面板

4．求解

GUI：Main Menu→Solution→Solve→Current LS，弹出“求解提示”对话框，单击“OK”按钮。

11.6.3 后处理

图 11-20～图 11-31 分别给出了圆柱体挤压过程中不同时刻的等效应力和等效塑性应变云图，图 11-32 和图 11-33 分别给出了不同节点处的等效应力和等效塑性应变随时间的变化关系，具体查看方法用户可以参见本章的视频教程。

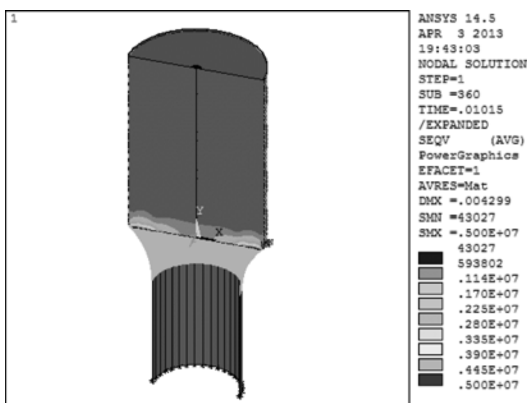


图 11-20　0.01015s 时刻的等效应力云图

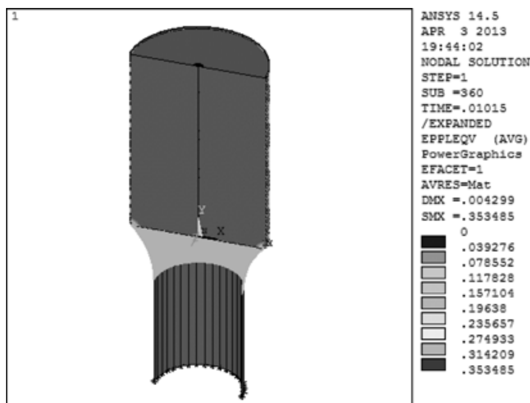


图 11-21　0.01015s 时刻的等效塑性应变云图

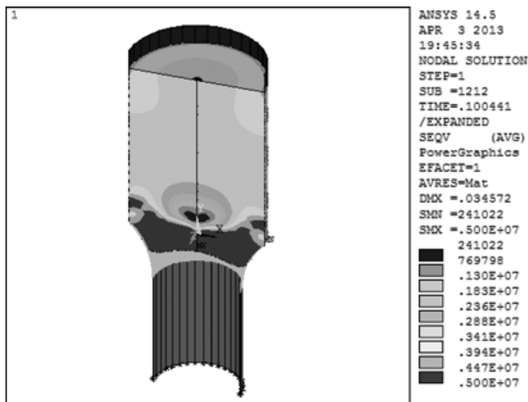


图 11-22　0.100441s 时刻的等效应力云图

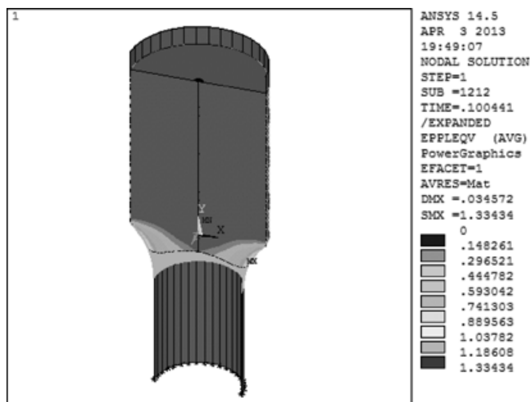


图 11-23　0.100441s 时刻的等效塑性应变云图

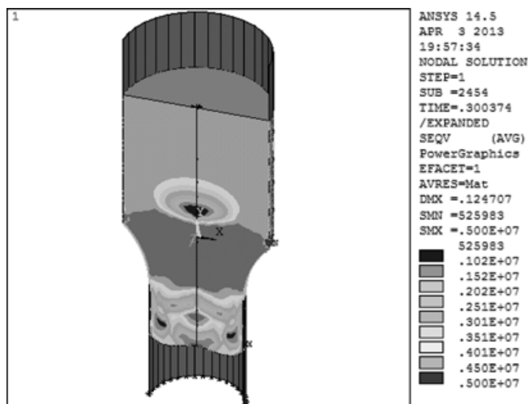


图 11-24　0.300374s 时刻的等效应力云图

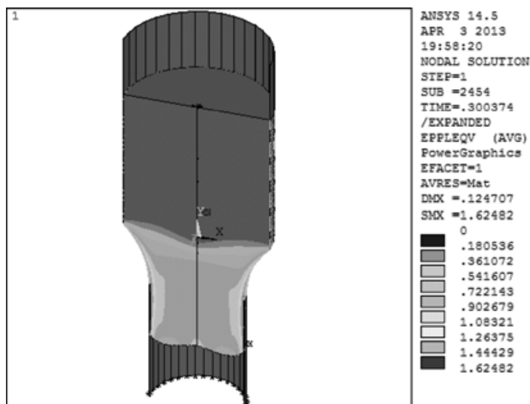


图 11-25　0.300374s 时刻的等效塑性应变云图

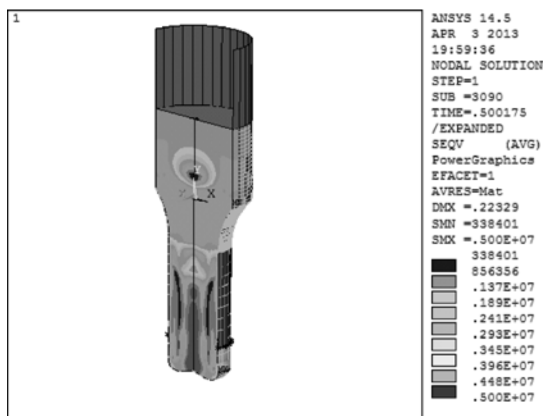


图 11-26 0.500175s 时刻的等效应力云图

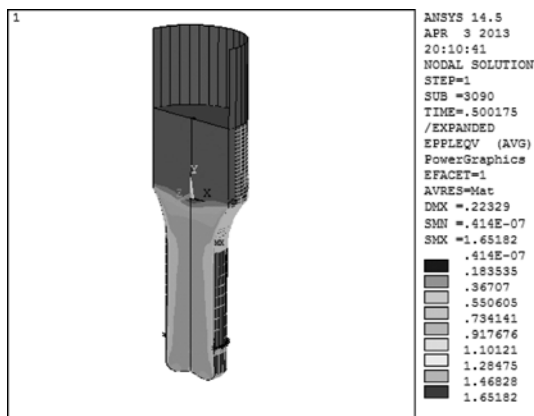


图 11-27 0.500175s 时刻的等效塑性应变云图

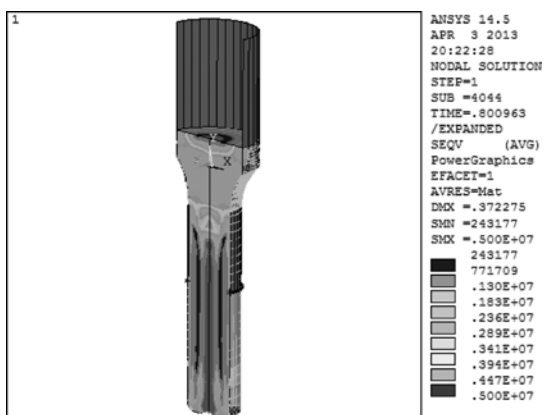


图 11-28 0.500175s 时刻的等效应力云图

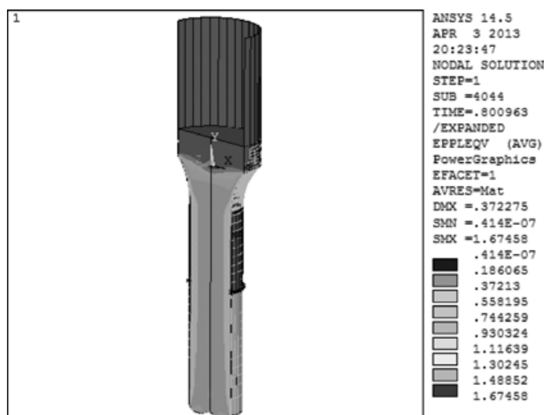


图 11-29 0.500175s 时刻的等效塑性应变云图

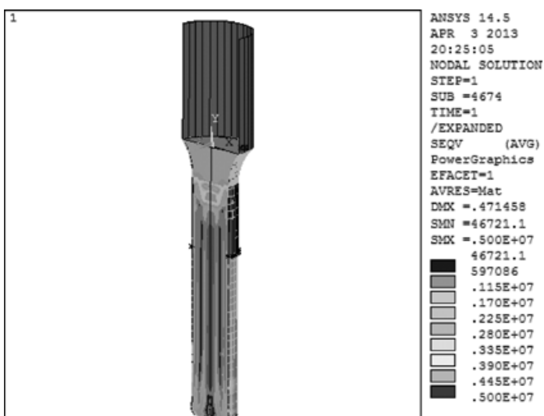


图 11-30 1s 时刻的等效应力云图

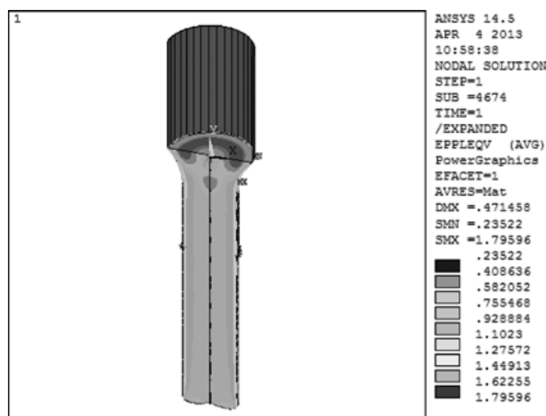


图 11-31 1s 时刻的等效塑性应变云图

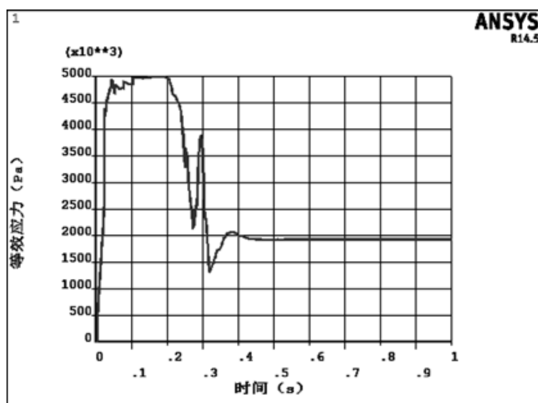


图 11-32　501 节点处等效应力与时间的关系

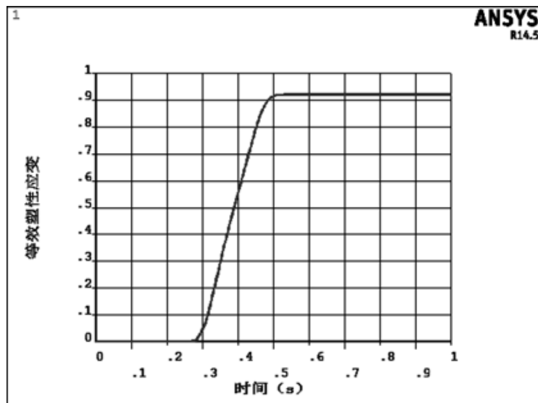


图 11-33　395 节点处等效塑性应变与时间的关系

11.7　命令流

```
/FILNAME,Cylinder extrusion,0
!进入前处理
/PREP7
ET,1,PLANE182      !定义二维平面单元
!设置单元关键字
KEYOPT,1,1,0
KEYOPT,1,3,1
KEYOPT,1,6,0
!定义材料参数
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,1,,2E11
MPDATA,PRXY,1,,0.3
TB,BISO,1,1,2,
TBTEMP,0
TBDATA,,5E6,0,,,,
!设置角度单位
*AFUN,DEG
!建立关键点
K,1,0,0
K,2,0.07,0
K,3,0.07,0.2
K,4,0,0.2
K,5,0.07,0
K,6,0.07,0.2
K,7,0.07+0.085*COS(45)-0.085*COS(22.5),-(0.085*SIN(45)-0.085*SIN(22.5))
K,8,0.07-0.085+0.085*COS(45),-0.085*SIN(45)
K,9,0.07-0.085+0.085*COS(45),-0.085*SIN(45)-0.12
!定义样条曲线
```



```
BSPLIN,5,7,8
L,8,9
L,5,6
A,1,2,3,4
!划分网格
ESIZE,0.005
AMESH,ALL
!定义接触对
!定义接触对的方法用户可以参见本章的视频教程
!进去求解器
/SOL
ANTYPE,0
NLGEOM,1    !激活大变形
!定义边界条件
DL,7, ,UX,
D,645, , , , , ,ALL, , , , ,
DL,6, ,UY,-0.2
OUTRES,ALL,6, !设置计算结果的输出控制
TIME,1
AUTOTS,-1
NSUBST,300,,,1
KBC,0
SOLVE
```

第 12 例　齿轮动态接触的热-结构耦合分析

12.1　实例覆盖的知识点

读者通过学习该实例可以掌握如下 ANSYS 的知识点。

1）瞬态的直接法热-结构耦合分析步骤。

2）模型的导入方法。

3）使用接触向导完成柔-柔节点和带控制节点的高级接触。

4）实现齿轮转动的方法。

5）网格划分控制方法。

6）激活大变形的方法。

7）激活 HHT 瞬态动力学求解方法。

12.2　模型

图 12-1 给出了齿轮动态接触平面模型，该模型中由小齿轮和大齿轮组成，该模型已经建立好，计算时将光盘的 gear 文件复制到 ANSYS 的工作目录中导入即可。

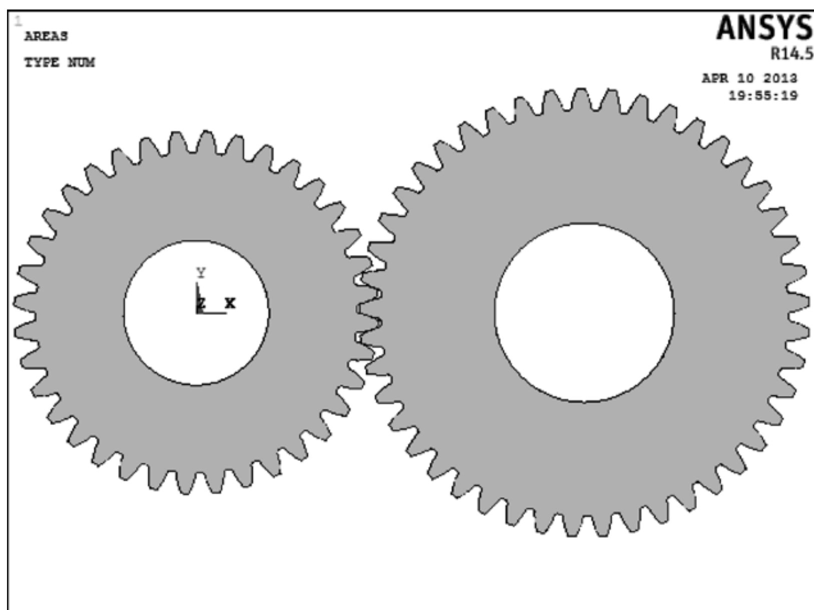


图 12-1　齿轮动态接触平面模型

12.3　单元



本实例使用多场耦合平面单元 PLANE223，设置其耦合场为热-结构耦合，并设置其单元行为为平面应变。两个齿轮中的接触关系通过接触向导完成。

12.4　材料参数

本实例假设两个齿轮应力-应变关系为线弹性，弹性模量 2E11Pa，泊松比为 0.3，密度为 7800kg/m^3，热膨胀系数为 3.3E-5，比热为 400，导热系数为 60.5。

12.5　边界条件和载荷

约束小齿轮和大齿轮内圈的平动位移，给小齿轮施加一个转动位移 0.75 弧度，模型的计算时间为 0.1s。

12.6　GUI 操作

12.6.1　前处理

1．定义文件名

GUI：Utility Menu→File→Change Jobname，弹出一个对话框，在输入栏中输入“Gear dynamic contact”，单击“OK”按钮。

2．导入模型

GUI：Utility Menu→File→Import→IGES，弹出如图 12-2 所示的“导入 IGES 文件”设置面板，保持默认设置，单击“OK”按钮，继续单击“Browse...”按钮，选择工作目录中的 gear 文件，单击“打开”按钮后继续单击“OK”按钮。



图 12-2　导入 IGES 文件设置面板

3．合并编号

GUI：Main Menu→Preprocessor→Numbering Ctrls→Merge Items，弹出如图 12-3 所示的合并编号设置面板，选择合并选项标签为“ALL”，单击“OK”按钮。

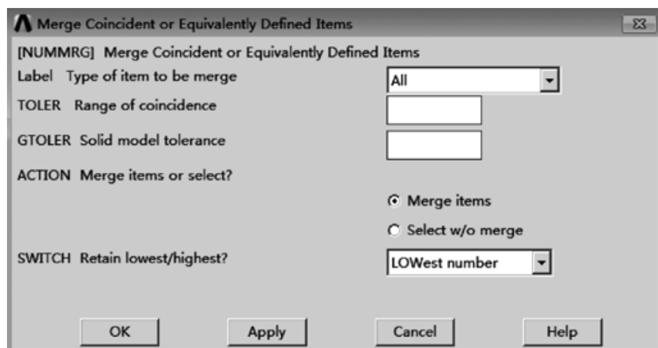


图 12-3 合并编号设置面板

4．选择单元

（1）定义单元

GUI：Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add→Edit→Delete，单击“Add”按钮，弹出如图 12-4 所示的“单元类型选择”对话框，在弹出对话框的左边选择“Coupled Field”，在右边选择“Quad 8 node 223”单元，单击“OK”按钮。

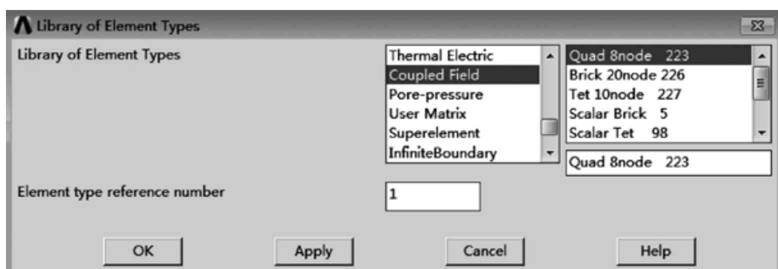


图 12-4 “单元类型选择”对话框

（2）设置单元关键字

在“单元类型”对话框中选择“PLANE223”，然后选择“Options”选项，弹出如图 12-5 所示的“PLANE223 单元关键字”设置面板，设置“Analysis Type”“Structural-thermal”，设置“Element behavior”为“Plane strain”；单击“OK”按钮返回单元类型界面，然后单击“Close”按钮关闭对话框。

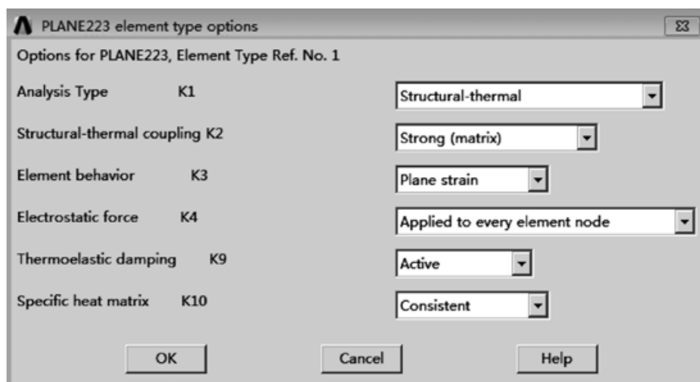


图 12-5 “PLANE223 单元关键字”设置面板

5．定义材料模型

GUI：Main Menu→Preprocessor→Material Props→Material Models，弹出一个对话框，单击 Structural→Liner→Elastic→Isotropic，弹出如图 12-6 所示的“线弹性各向同性材料属性参数”设置面板，输入 EX 为“2E11”，PRXY 为“0.3”，单击“OK”按钮。

设置材料的密度，单击 Structural→Density，弹出如图 12-7 所示的“材料密度”设置面板，输入 DENS 为“7800”，单击“OK”按钮。

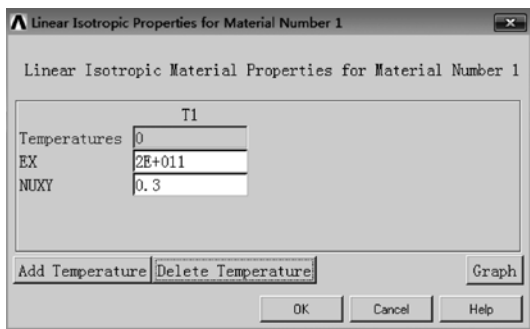


图 12-6 “线弹性各向同性材料属性参数”设置面板

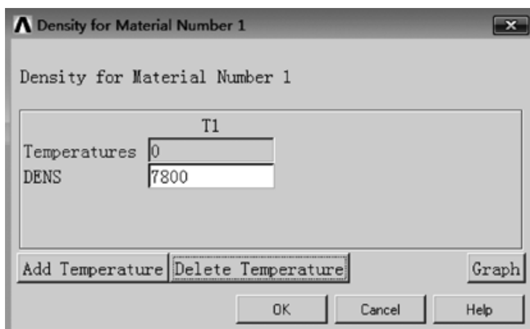


图 12-7 “材料密度”设置面板

设置材料的比热，单击 Thermal→Specific Heat，弹出如图 12-8 所示的“材料比热”设置面板，输入 C 为“400”，单击“OK”按钮。

设置热膨胀系数，单击 Structural→Thermal Expansion→Secent Coefficiemt→Isotropic，弹出如图 12-9 所示的“材料的热膨胀系数”设置面板，输入参考温度“20”，热膨胀系数 ALPX 为“3.3E-5”，单击“OK”按钮。

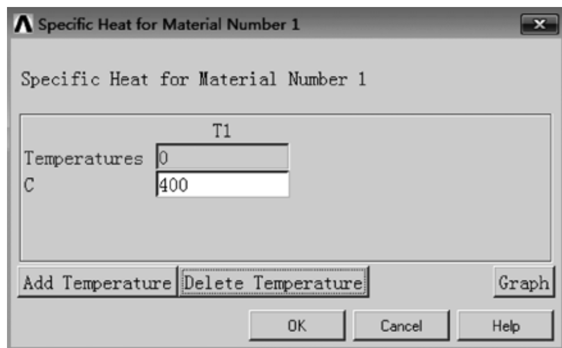


图 12-8 “材料比热”设置面板

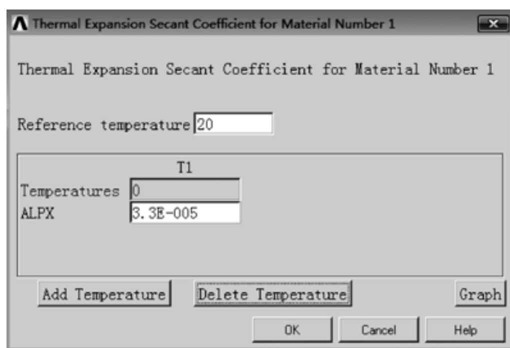


图 12-9 “材料的热膨胀系数”设置面板

设置热传导系数，单击 Thermal→Conductivity，弹出如图 12-10 所示的“材料的导热系数”设置面板，输入导热系数 KXX 为“60.5”，单击“OK”按钮。

6．划分网格

（1）打开网格划分工具

GUI：Main Menu→Preprocessor→Meshing→MeshTool。

（2）设置总体网格尺寸

选择如图 12-11 所示的“网格划分”工具面板中“尺寸控制”子面板中的“Global”选项并单击“Set”按钮，弹出如图 12-12 所示的“总体网格尺寸”设置面板。



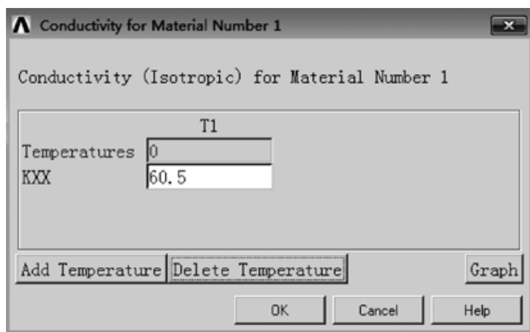


图 12-10 “材料的导热系数”设置面板

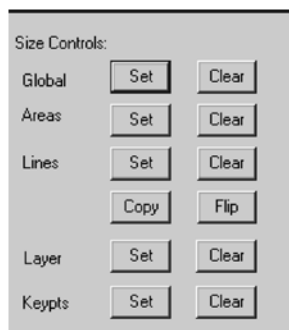


图 12-11 “网格划分”工具面板中“尺寸控制”子面板

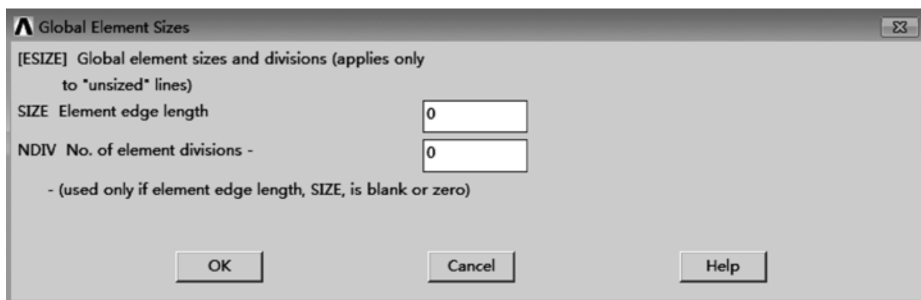


图 12-12 “总体网格尺寸”设置面板

该设置面板中存在两个控制选项，“Element edge length”和“No. of element divisions”，“Element edge length”设为“0.005”，单击“OK”按钮。

（3）设置齿轮外轮廓线的单元数

选择“网格划分”工具面板上的 Size Controls→Lizes→Set，弹出如图 12-13 所示的“拾取线”设置面板，拾取方式选择“Loop”，选择两个齿轮的外轮廓线，单击“OK”按钮，弹出如图 12-14 所示的“在线上设置单元尺寸”设置面板，“Element edge length”设为“0.0012”，单击“OK”按钮。

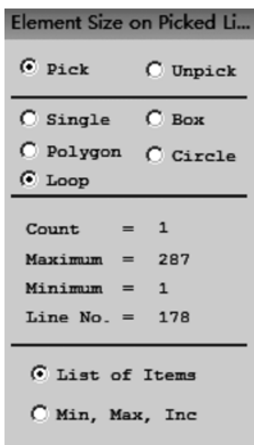


图 12-13 “拾取线”设置面板

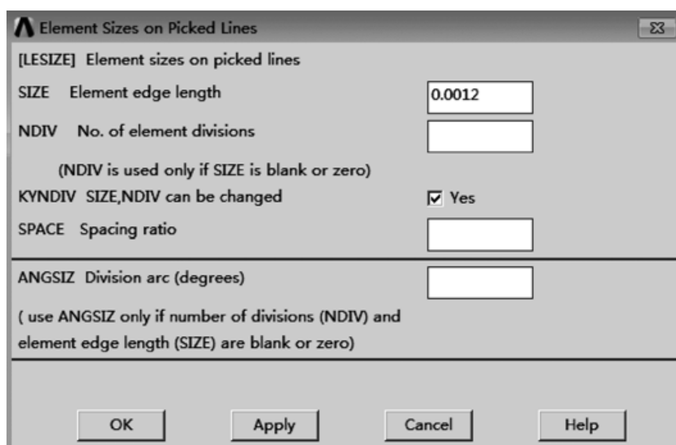


图 12-14 “在线上设置单元尺寸”设置面板

（4）划分网格

单击“网格划分”工具面板上的“Mesh”按钮，弹出“拾取”对话框，单击“Pick All”按钮。

7. 定义接触对

（1）打开接触管理器

单击主菜单中的图标，单开如图 12-15 所示的“接触管理器”面板。

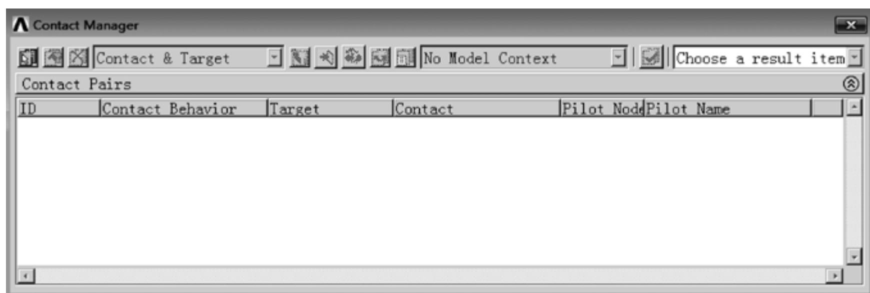


图 12-15 “接触管理器”面板

（2）创建小齿轮的控制节点接触

单击接触管理器中的，弹出如图 12-16 所示的“目标面及目标单元类型”设置面板，在该面板中“Target Surface”选择“Lines”，“Target Type”选择“Pilot Node Only”，单击“Next”按钮，弹出如图 12-17 所示的“控制节点位置”设置面板，保持默认设置，单击“Next”按钮，弹出如图 12-18 所示的“接触面及接触单元类型”设置面板，保持默认设置，单击“Pick Contact”按钮，弹出“拾取”对话框，拾取小齿轮内孔上的线 L287、L288、L289 和 L300，单击“Apply”按钮，返回图 12-18，单击“Next”按钮，弹出如图 12-19 所示的“目标面自由度”设置面板，设置“Constraint Surface Type”为“Rigid constraint”，“Boundary conditions on target”设为“User specified”，单击“Creat”按钮来创建接触对。

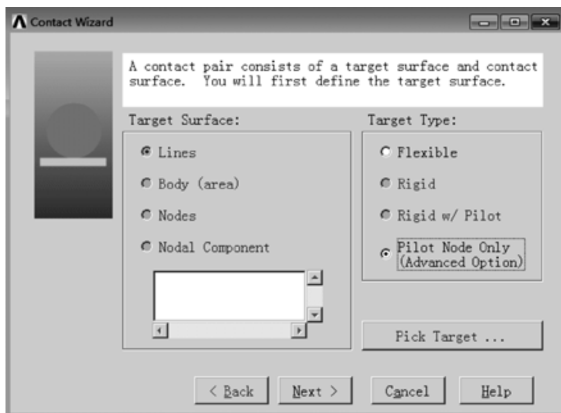


图 12-16 “目标面及目标单元类型”设置面板

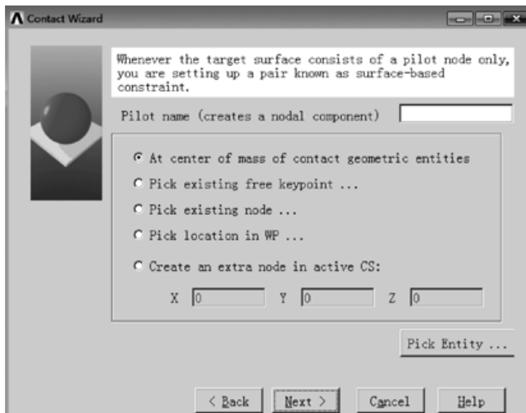


图 12-17 “控制节点位置”设置面板

（3）创建大齿轮的控制节点接触

单击接触管理器中的，弹出如图 12-16 所示的“目标面及目标单元类型”设置面板，在该面板中“Target Surface”选择“Lines”，“Target Type”选择“Pilot Node Only”，单击

“Next”按钮，弹出图 12-17 所示的“控制节点位置”设置面板，保持默认设置，单击“Next”按钮，弹出图 12-18 所示的“接触面及接触单元类型”设置面板，保持默认设置，单击“Pick Contact”按钮，弹出“拾取”对话框，拾取大齿轮内孔上的线 L579、L580、L581 和 L582，单击“Apply”按钮，返回图 12-18，单击“Next”按钮，弹出如图 12-19 所示的“目标面自由度”设置面板，设置“Constraint Surface Type”为“Rigid constraint”，“Boundary conditions on target”设为“User specified”，单击“Creat”按钮来创建接触对。

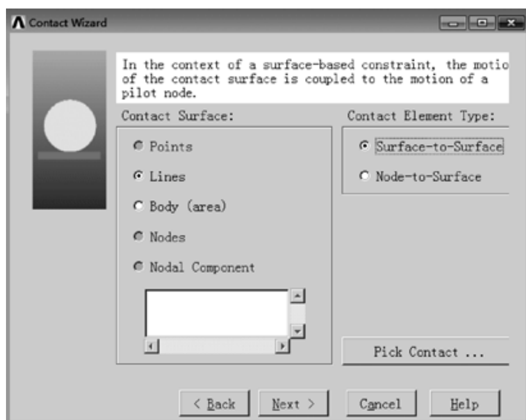


图 12-18 “接触面及接触单元类型”设置面板

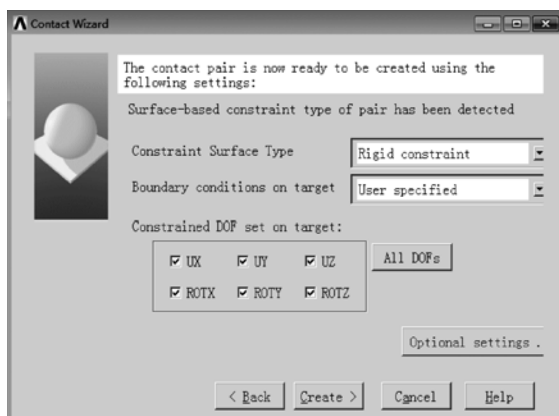


图 12-19 “目标面自由度”设置面板

（4）创建小齿轮与大齿轮之间的接触对

单击接触管理器中的▣，弹出如图 12-16 所示的“目标面及目标单元类型”设置面板，在该面板中“Target Surface”选择“Lines”，“Target Type”选择“Flexible”，单击“Pick Targer...”按钮，弹出“拾取”对话框，“Target Type”选择“Loop”，选择小齿轮的外轮廓线，单击“OK”按钮，返回图 12-16，单击“Next”按钮，弹出图 12-18 所示的“接触面及接触单元类型”设置面板，保持默认设置，单击“Pick Contact”，弹出“拾取”对话框，选择拾取方式为“Loop”，选择大齿轮的外轮廓线，单击“OK”按钮，返回图 12-18，单击“Next”按钮，弹出如图 12-20 所示的“创建接触对”设置面板，输入摩擦系数为“0.12”，接触导热系数为“2e6”，单击“Creat”按钮。

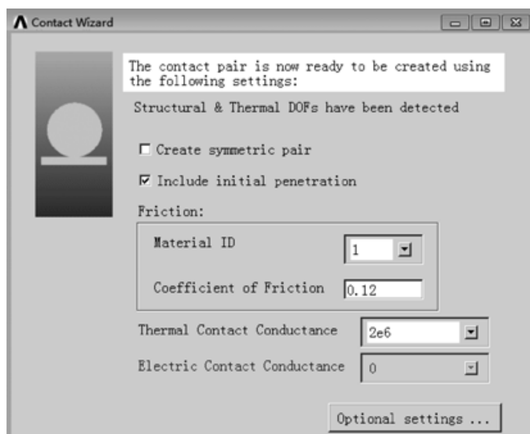


图 12-20 创建接触对设置面板

12.6.2 求解

1．设置分析类型

（1）激活瞬态分析

GUI：Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis，弹出如图 12-21 所示的“分析类型”设置面板，“Type of analysis”选择“Transient”，单击“OK”按钮。

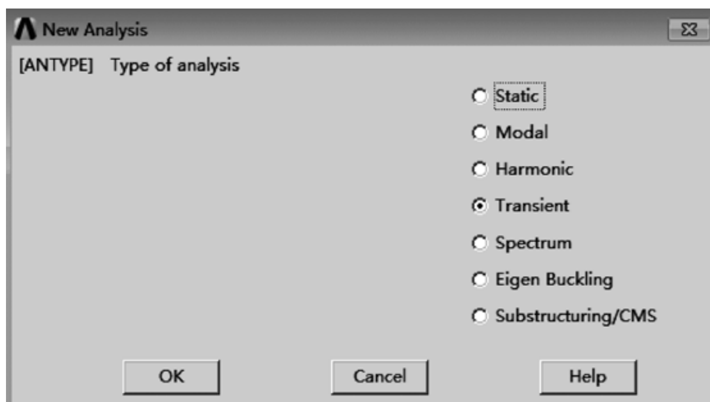


图 12-21 “分析类型”设置面板

（2）设置分析选项

GUI：Main Menu→Preprocessor→Loads→Analysis Type→Analysis Options，弹出如图 12-22 所示的“瞬态分析选项”设置面板，勾选“Large deform effects”复选框，激活大变形分析，其他设置保存默认设置，单击“OK”按钮。

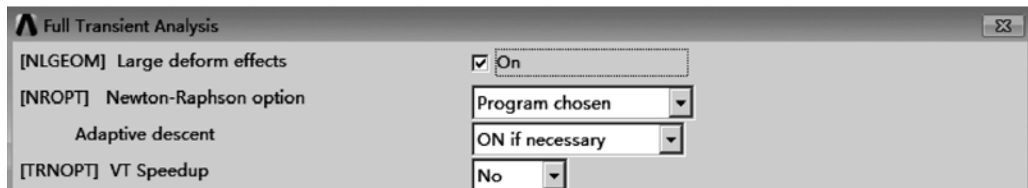


图 12-22 “瞬态分析选项”设置面板

（3）设置瞬态求解算法

GUI：Main Menu→Solution→Analysis Type→Sol'n Controls→Transient，弹出如图 12-23 所示的“瞬态求解积分算法”设置面板，选择算法为“HHT”，幅值衰减系数为“0.004”，单击“OK”按钮。

2．载荷的基本设置

（1）定义初始均匀温度

GUI：Main Menu→Solution→Define Loads→Settings→Uniform Temp，弹出如图 12-24 所示的“均匀温度”设置面板，输入模型的初始均匀温度为“20”，单击“OK”按钮。

（2）定义模型的参考温度

GUI：Main Menu→Solution→Define Loads→Settings→Reference Temp，弹出如图 12-25

所示的“参考温度”设置面板，输入模型的参考温度为“20”，单击“OK”按钮。

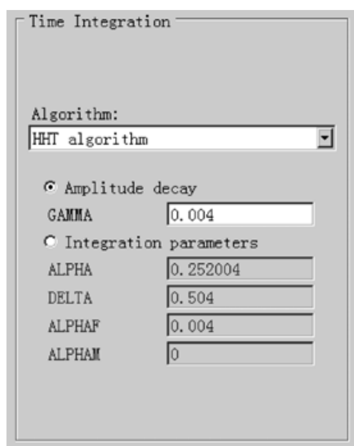


图 12-23 “瞬态求解积分算法”设置面板

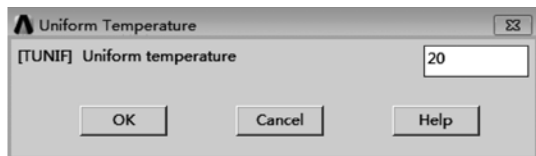


图 12-24 “均匀温度”设置面板

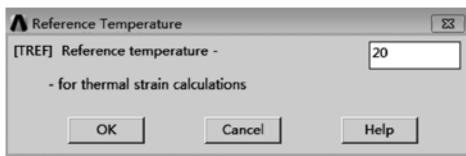


图 12-25 “参考温度”设置面板

3．定义边界条件

（1）约束小齿轮和大齿轮内孔的平动位移

GUI： Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Nodes，弹出“拾取”对话框，拾取小齿轮和大齿轮的控制节点 50381 和控制节点 50382，单击“OK”按钮，弹出如图 12-26 所示的“在节点处施加位移约束”设置面板，选择约束类型为“UX”和“UY”，单击“OK”按钮。

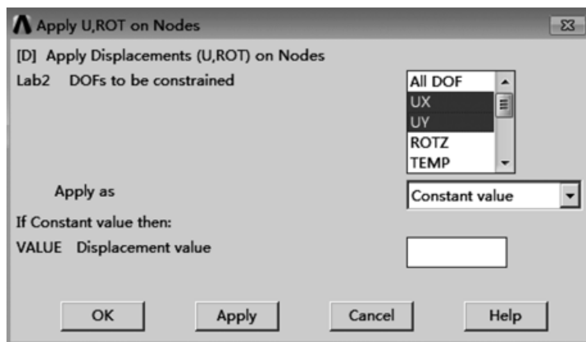


图 12-26 “在节点处施加位移约束”设置面板

（2）施加小齿轮的转动位移

GUI： Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Nodes，弹出“拾取”对话框，拾取小齿轮的控制节点 50381，单击“OK”按钮，弹出如

图 12-26 所示的“在节点处施加位移约束”设置面板，选择约束类型为“ROTZ”，输入转动位移值为“0.75”，单击“OK”按钮。

（3）定义齿轮外轮廓和内孔的对流边界

GUI：Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Thermal→Convection→On Lines，弹出“拾取”对话框，选择拾取方式为“Loop”，拾取齿轮的内孔和轮廓线，单击“OK”按钮，弹出如图 12-27 所示的“在线上施加对流换热系数”设置面板，“Film coefficient”设为“30”，“Bulk temperature”设为“20”，单击“OK”按钮。

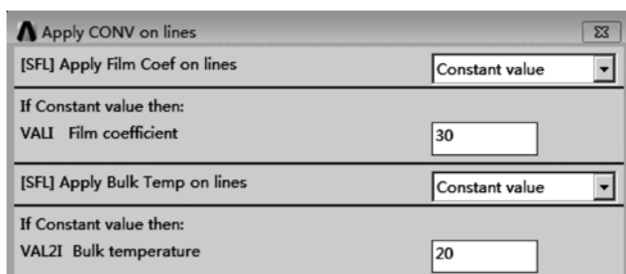


图 12-27 “在线上施加对流换热系数”设置面板

4．定义载荷步

（1）设置输出控制

GUI：Main Menu→Solution→Load Step Opts→Output Ctrls→DB→Results File，在弹出的“计算结果输出”控制面板选择“Every substep”，单击“OK”按钮。

（2）设置计算时间和子步

GUI：Main Menu→Solution→Load Step Opts→Time→Frequenc→Time→Time Step，弹出如图 12-28 所示的“时间和时间步选项”设置面板，“Time at end of load step”设为“0.1”，“Time step size”设为“0.0008”，“Automatic time stepping”选择“ON”，其他保持默认设置，单击“OK”按钮。

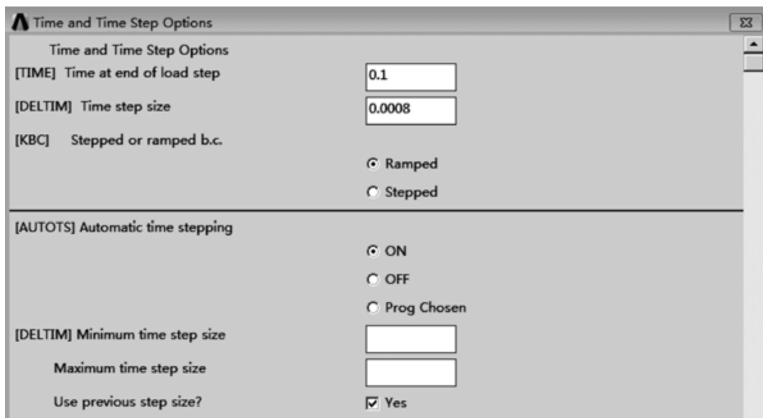


图 12-28 “时间和时间步选项”设置面板

5．求解

GUI：Main Menu→Solution→Solve→Current LS，弹出“求解提示”对话框，单击“OK”按钮。



12.6.3 后处理

图 12-29～图 12-38 给出了不同时刻齿轮动态接触的温度和等效应力云图，图 12-39～图 12-42 分别给出了不同时刻齿轮动态接触的接触压力云图，图 12-43 和图 12-44 分别给出了 1220 节点处温度和等效应力与时间的关系，具体查看方法读者可参考本章的视频教程。

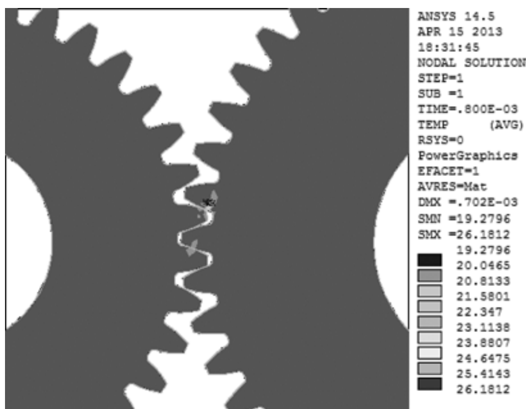


图 12-29　0.0008s 时刻温度云图

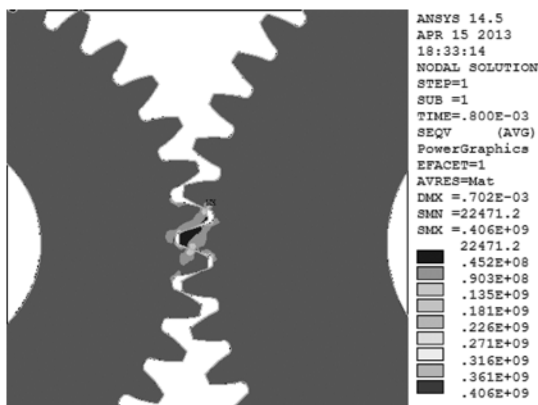


图 12-30　0.0008s 时刻等效应力云图

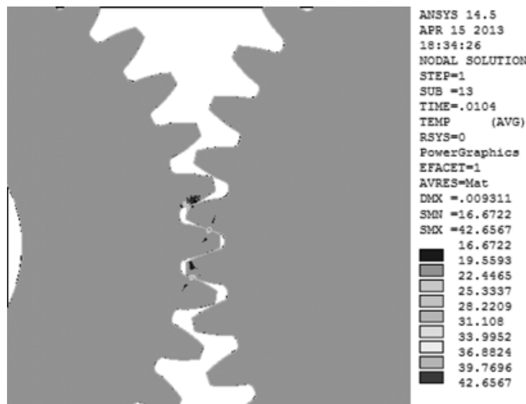


图 12-31　0.0104s 时刻温度云图

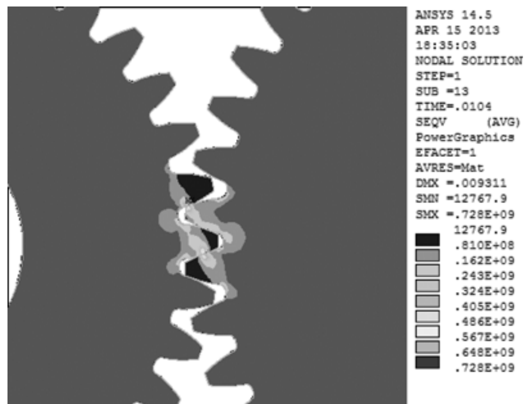


图 12-32　0.0104s 时刻等效应力云图

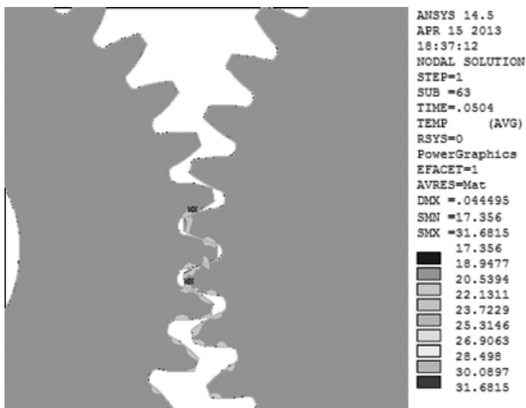


图 12-33　0.0504s 时刻温度云图

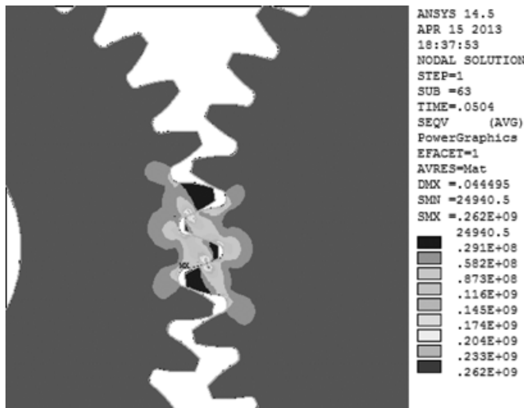


图 12-34　0.0504s 时刻等效应力云图

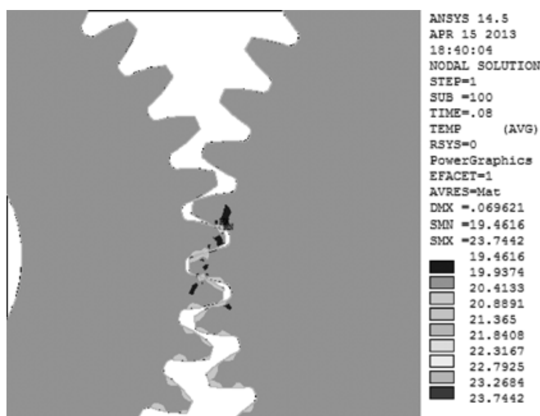


图 12-35　0.08s 时刻温度云图

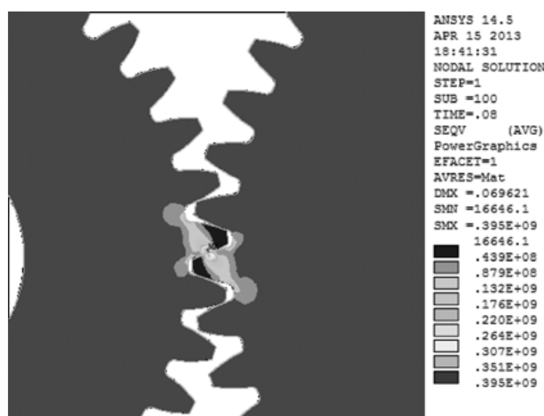


图 12-36　0.08s 时刻等效应力云图

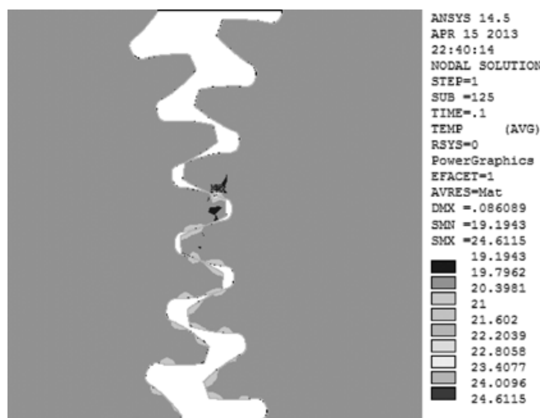


图 12-37　0.1s 时刻温度云图

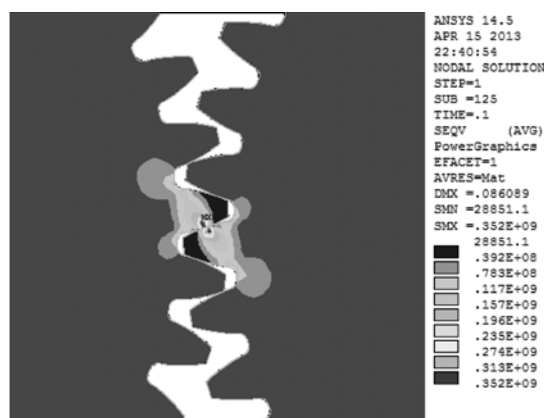


图 12-38　0.1s 时刻等效应力云图

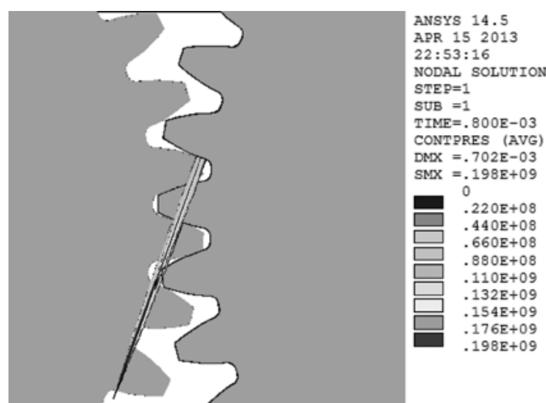


图 12-39　0.0008s 时刻接触压力云图

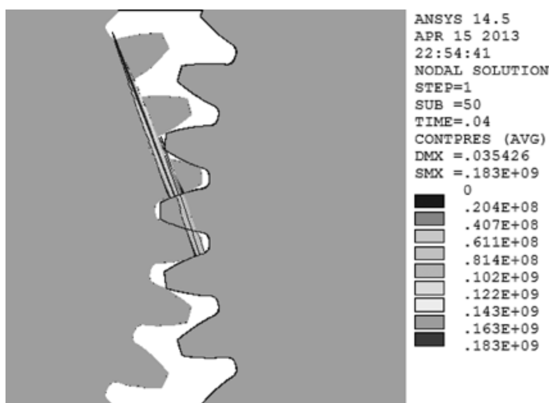


图 12-40　0.04s 时刻接触压力云图

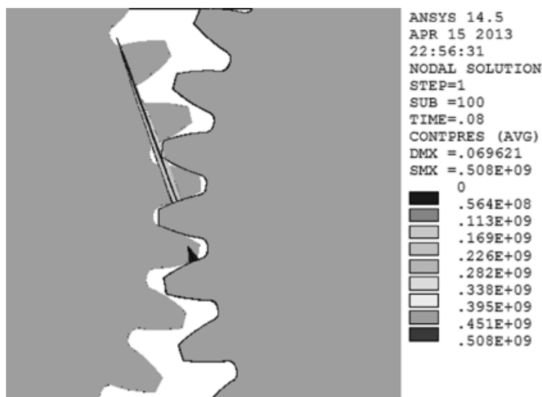


图 12-41　0.08s 时刻接触压力云图

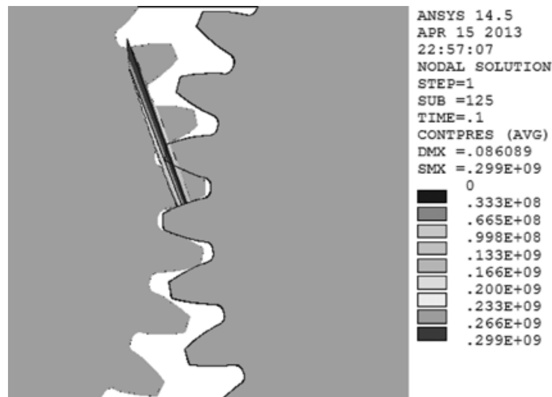


图 12-42　0.1s 时刻接触压力云图

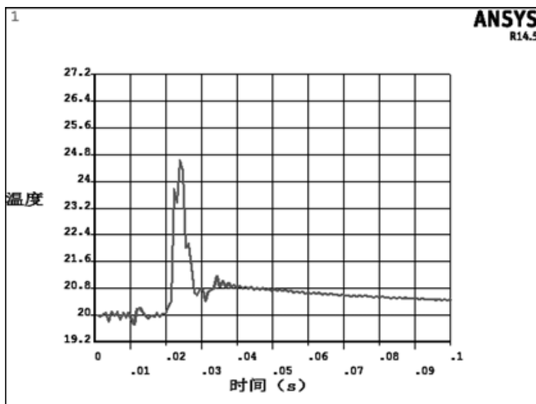


图 12-43　1220 节点处温度与时间的关系

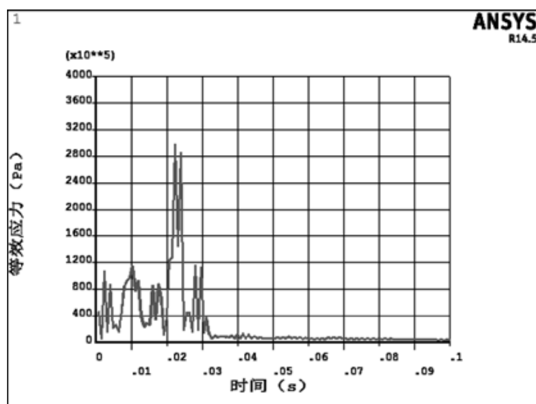


图 12-44　1220 节点处等效应力与时间的关系

12.7　命令流

```
/FILNAME,Gear dynamic contact,0
!导入模型
/CLEAR,NOSTART    ! Clear model since no SAVE found
! WE SUGGEST YOU REMOVE THIS LINE AND THE FOLLOWING STARTUP LINES
/input,start145,ans,'d:\Program Files\ANSYS Inc\v145\ANSYS\apdl\'
/AUX15
!*
IOPTN,IGES,SMOOTH
IOPTN,MERGE,YES
IOPTN,SOLID,YES
IOPTN,SMALL,YES
IOPTN,GTOLER, DEFA
IGESIN,'gear',' ',' '
APLOT
```



```
!*
/VIEW,1,,,1
/ANG,1
/REP,FAST
)/GOP       ! Resume printing after UNDO process
)! We suggest a save at this point
!进入前处理
/PREP7
!合并导入模型的所有项
NUMMRG,ALL, , , ,LOW
!定义热-结构平面单元
ET,1,223
!设置单元关键字
KEYOPT,1,1,11
KEYOPT,1,2,0
KEYOPT,1,3,2
!定义齿轮的材料参数
MP,EX,1,2E11
MP,NUXY,1,0.3
MP,DENS,1,7800
MP,ALPX,1,3.3E-5
MP,C,1,400
MP,KXX,1,60.5
!划分网格
ESIZE,0.005
FLST,5,279,4,ORDE,4
FITEM,5,149
FITEM,5,-292
FITEM,5,440
FITEM,5,-574
CM,_Y,LINE
LSEL, , , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
LESIZE,_Y1,0.0012, , , , , , ,1
AMESH,ALL
!创建接触对
!定义的接触的方法，用户可以参见本章的视频教程
!进入求解
/SOL
ANTYPE,4 !设置分析类型为瞬态分析
NLGEOM,1   !激活大变形；
TRNOPT,FULL
LUMPM,0
!设置瞬态动力学的求解方法为 HHT
TRNOPT,,,,,,HHT
```

```
TINTP,0.004
TUNIF,20,   !设置模型的初始温度
TREF,20,    !设置模型的参考温度
!定义结构边界条件
D,50381, , , , , ,UX,UY, , , ,
D,50382, , , , , ,UX,UY, , , ,
D,50382, ,0.75, , , ,ROTZ, , , , ,
!定义热分析边界条件
FLST,2,287,4,ORDE,8
FITEM,2,149
FITEM,2,-292
FITEM,2,297
FITEM,2,-300
FITEM,2,440
FITEM,2,-574
FITEM,2,579
FITEM,2,-582
/GO
SFL,P51X,CONV,30, ,20,
OUTRES,ALL,ALL,
TIME,0.1   !设置计算时间
AUTOTS,1   !打开自动时间积分
DELTIM,0.0008, , ,1
KBC,0
TSRES,ERASE
SOLVE
```

第 13 例　离合器轮盘的预应力模态分析



13.1　实例覆盖的知识点

读者通过学习该实例可以掌握如下 Workbench 的知识点。

1）在 Workbench 环境下进行预应力模型分析步骤。

2）定义材料模型的方法。

3）建立局部坐标系的方法。

4）施加转速的方法。

5）定义位移约束的方法。

13.2　问题的描述

13.2.1 几何模型

图 13-1 给出了某汽车上离合器的轮盘三维模型图。该模型是在 SolidWorks 上完成建模的，在该实例中可以导入后直接使用。



图 13-1　轮盘的三维模型图

13.2.2 材料参数

该轮盘的材料为结构钢，弹性模量为 2.01E11Pa，泊松比为 0.29，密度为 7100kg/m^3。

13.2.3 边界条件和载荷

约束轮盘内孔上的径向和轴向位移，考虑由于轮盘转动产生的惯性力，其转速为 75rad/s。

13.3 GUI 操作

13.3.1 建立预应力模态分析系统

启动 Workbench，双击 Workbench 工具箱中的用户系统-Pre-Stress Modal，弹出如图 13-2 所示的“预应力模态分析系统”工程图，由图可知，预应力模态分析系统由静态结构分析系统和模态分析系统组成。

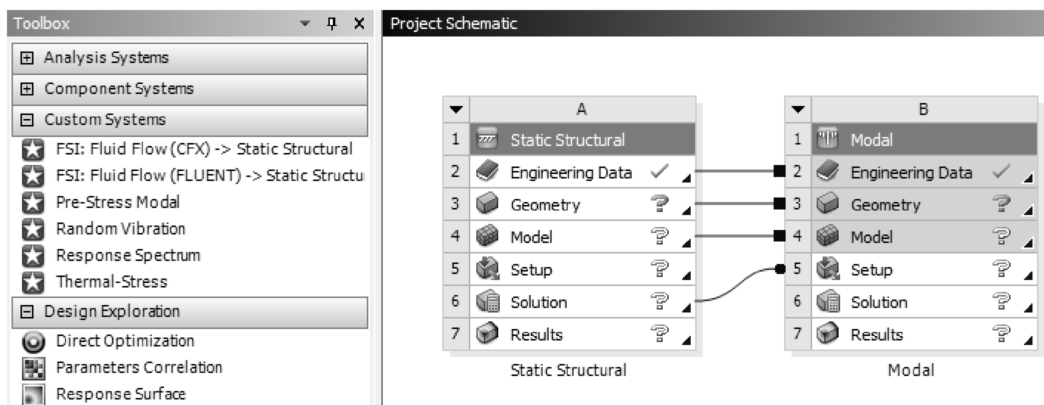


图 13-2 “预应力模态分析系统”工程图

13.3.2 定义材料数据

单击静态结构分析系统中的“Engineering Data”子模块，单击“Structural Steel”上的结构钢选项，弹出如图 13-3 所示的“结构钢材料”数据列表，将密度修改为“7100”，杨氏模量改为“2.01E11”，泊松比改为“0.29”，然后单击“Update Project”，最后单击“Return to Project”按钮。

13.3.3 建立几何模型

如图 13-4 所示，右击静态结构分析系统中的几何体选项，选择 Import Geometry→Browse，打开工作目录文件夹，选择轮盘模型文件，单击“OK”按钮。

Properties of Outline Row 4: Structural Steel

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Density	7100	kg m^-3		
3	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion				
4	Coefficient of Thermal Expansion	1.2E-05	C^-1		
5	Reference Temperature	22	C		
6	Isotropic Elasticity				
7	Derive from	Young's M...			
8	Young's Modulus	2.01E+11	Pa		
9	Poisson's Ratio	0.29			
10	Bulk Modulus	1.5952E+11	Pa		
11	Shear Modulus	7.7907E+10	Pa		
12	Alternating Stress Mean Stress	Tabular			
13	Interpolation	Log-Log			

图 13-3 “结构钢材料”数据列表



图 13-4 导入模型

13.3.4 创建有限元模型

选择预应力模态分析系统中的“Modal”选项，进入“Multiple Systems”，图 13-5 给出了“预应力模态分析”流程图，即首先进行静力学分析，然后将静力学分析获得的刚度考虑到下一步的模态分析中。

1. 为轮盘赋予材料

单击 Model→Geometry→轮盘，则弹出如图 13-6 所示的“轮盘细节”设置面板，用户一般只需设置该面板的两个子选项，“Definition”和“Material”选项即可。在“Definition”选项中，用户可以设置模型的“Stiffness Behavior”“Coordinate System”和“Reference

Temperature”；在“Material”选项中可以为模型指定“Assignment”，本实例选用材料为“Structural Steel”。

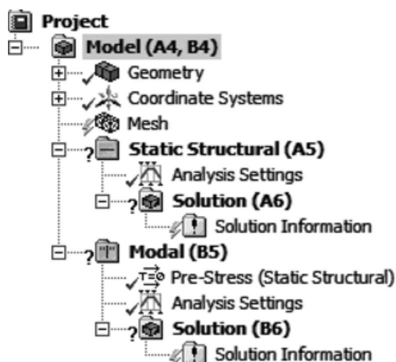
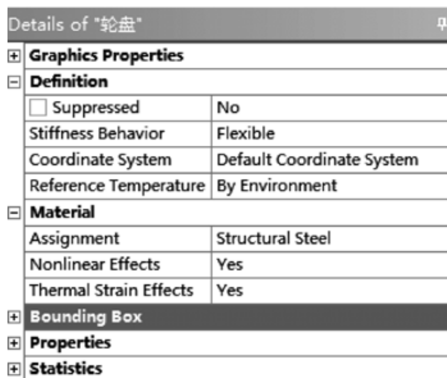


图 13-5 “预应力模态分析”流程图



Details of "轮盘"

Graphics Properties	
Definition	
Suppressed	No
Stiffness Behavior	Flexible
Coordinate System	Default Coordinate System
Reference Temperature	By Environment
Material	
Assignment	Structural Steel
Nonlinear Effects	Yes
Thermal Strain Effects	Yes
Bounding Box	
Properties	
Statistics	

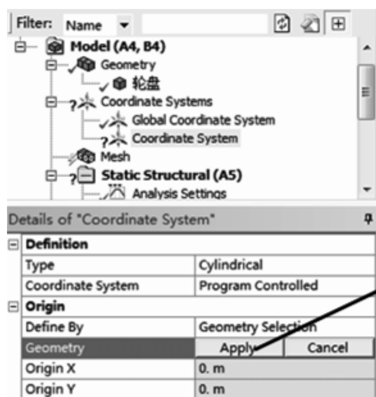
图 13-6 “轮盘细节”设置面板

2．建立局部坐标系

右击 Coordinate Sys→Insert→Coordinate System，弹出如图 13-7 所示的“局部坐标系细节”设置面板，选择轮盘的内孔面，单击“Geometry”中的“Apply”，设置局部坐标系的“Type”为“Cylindrical”。

3．网格划分

单击“Mesh”，弹出如图 13-8 所示的“网格划分细节”设置面板，设置“Relevance Center”为“Medium”，其他保持默认设置，然后右击“Mesh”按钮，选择“Generate Mesh”。



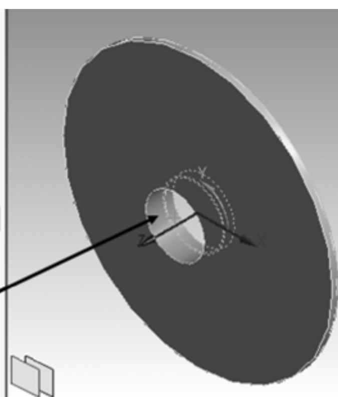
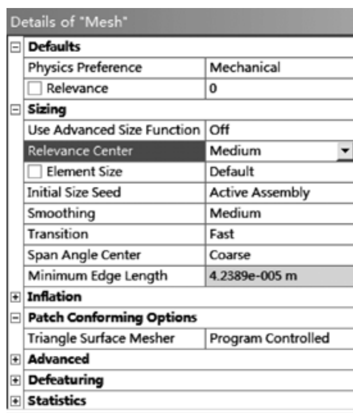


图 13-7 “局部坐标系细节”设置面板



Details of "Mesh"

Defaults	
Physics Preference	Mechanical
Relevance	0
Sizing	
Use Advanced Size Function	Off
Relevance Center	Medium
Element Size	Default
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	Medium
Transition	Fast
Span Angle Center	Coarse
Minimum Edge Length	4.2389e-005 m
Inflation	
Patch Conforming Options	
Triangle Surface Mesher	Program Controlled
Advanced	
Defeaturing	
Statistics	

图 13-8 “网格划分细节”设置面板

13.3.5 静力学求解

1．定义转速

右击“Static Structural”，按照图 13-9 选择 Insert→Rotational Velocity，在细节窗口弹出如图 13-10 所示的“转速细节”设置面板，按照图 13-10 所示进行设置。

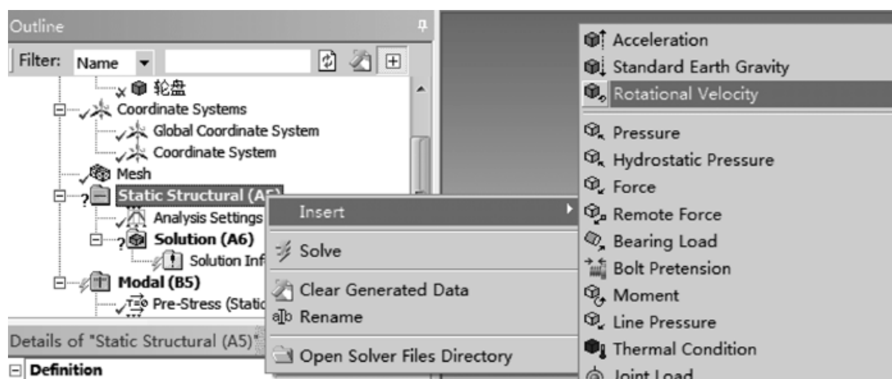
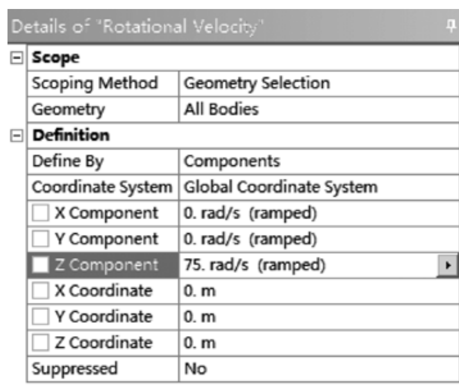


图 13-9 “定义转速设置路径”示意图


Details of "Rotational Velocity"

Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	All Bodies
Definition	
Define By	Components
Coordinate System	Global Coordinate System
X Component	0. rad/s (ramped)
Y Component	0. rad/s (ramped)
Z Component	75. rad/s (ramped)
X Coordinate	0. m
Y Coordinate	0. m
Z Coordinate	0. m
Suppressed	No

图 13-10 “转速细节”设置面板

2．定义位移约束

右击“Static Structural”，按照图 13-11 所示选择 Insert→Displacement，在细节窗口弹出如图 13-12 所示的“位移约束细节”设置面板，选择轮盘的内孔面，单击“Apply”按钮，其他设置按照图 13-12 进行设置。

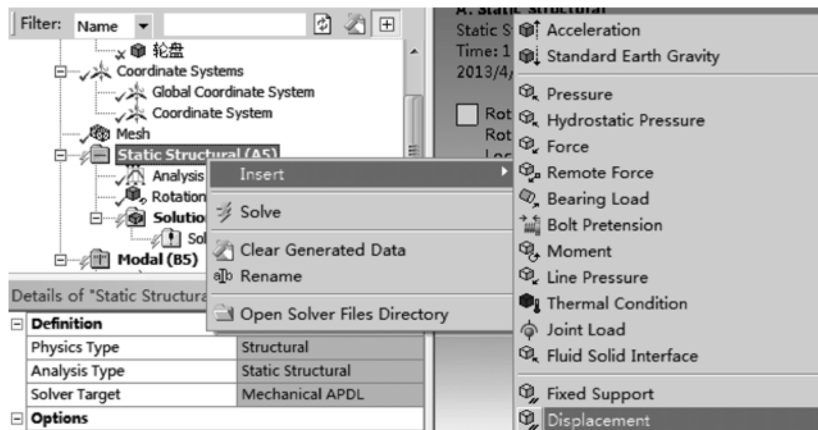


图 13-11 “定义位移约束路径”示意图



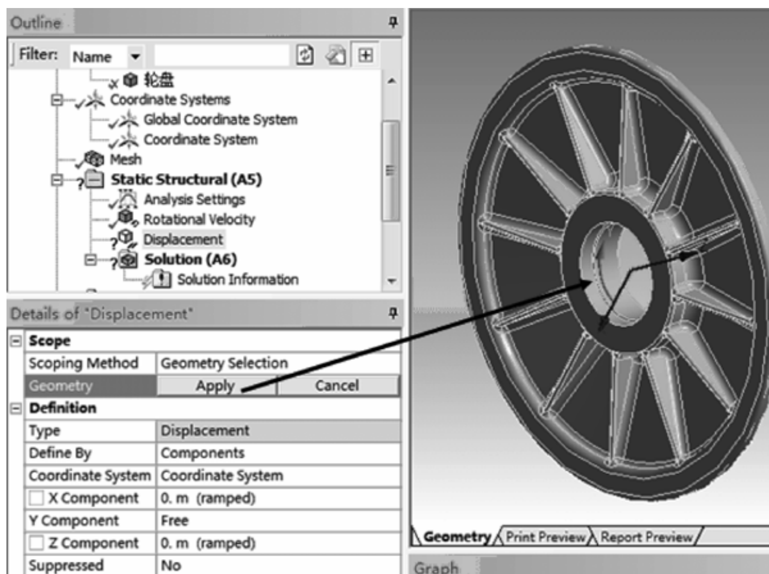


图 13-12 “位移约束细节”设置面板

3．求解

选择 Static Structural→Solution，右击“Solution”，选择“Solve”选项。

4．查看结果

图 13-13 和图 13-14 分别给出了轮盘的等效应力和变形云图，具体查看方法用户可以参见本章的视频教程。

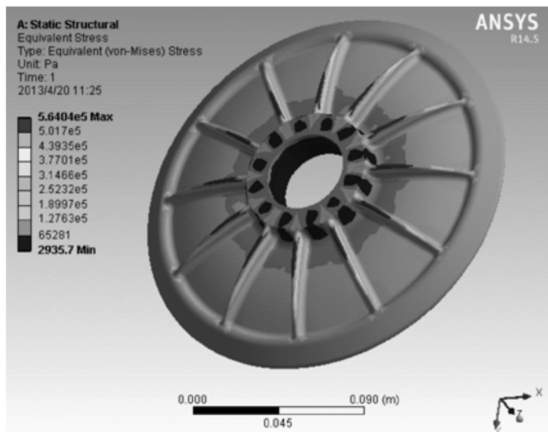


图 13-13 轮盘的等效应力云图

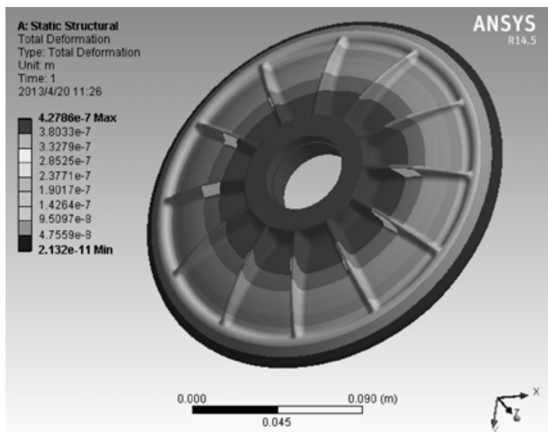


图 13-14 轮盘的变形云图

13.3.6 模态求解

1．模态分析设置

单击 Modal→Analysis Settings，在细节显示窗口弹出如图 13-15 所示的“模态分析”设置细节面板，修改提取的“Max Modes to Find”为“8”。

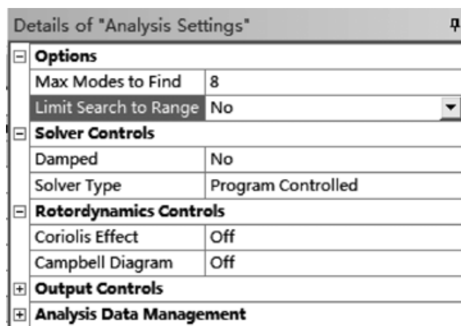


图 13-15 “模态分析”设置细节面板

2．求解

选择 Static Structural→Solution，右击“Solution”，选择“Solve”选项。

3．查看结果

图 13-16～图 13-18 分别给出了轮盘的前三阶振型云图，图 13-19 给出了轮盘计算的前 8 阶固有频率。

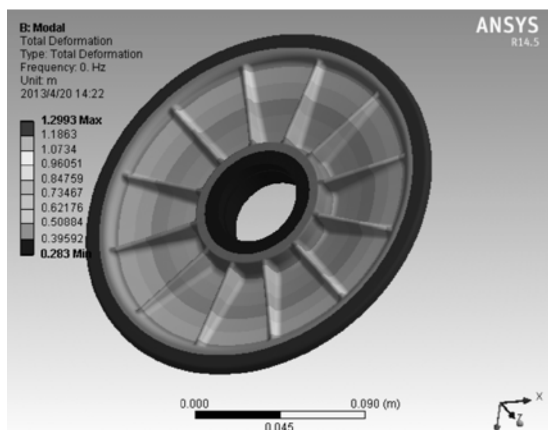


图 13-16 1 阶模态振型云图

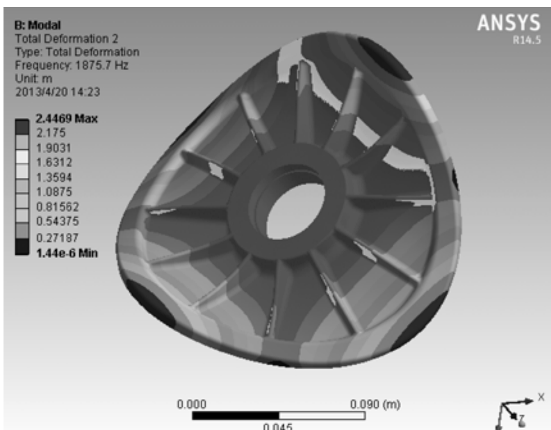


图 13-17 2 阶模态振型云图

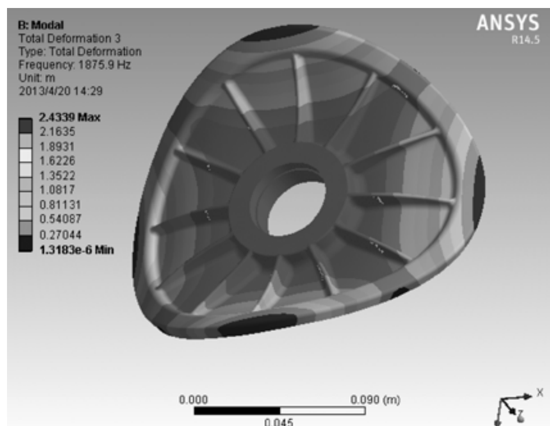


图 13-18 3 阶模态振型云图

	Mode	Frequency [Hz]
1	1.	0.
2	2.	1875.7
3	3.	1875.9
4	4.	1950.1
5	5.	1950.4
6	6.	2364.2
7	7.	2454.5
8	8.	2454.6

图 13-19 前 8 阶固有频率列表

第 14 例　气 穴 分 析

14.1　实例覆盖的知识点

读者通过学习该实例可以掌握如下 Workbench 的知识点。

1）使用 Fluent 进行气穴分析的基本步骤。

2）设置 Fluent 多相流的方法。

3）设置不同流体相相互作用。

4）Fluent 流体计算控制设置方法。

5）激活流体湍流模型的方法。

14.2　问题的描述

14.2.1 几何模型

以纯水液压外流式锥阀为例。由于锥阀是圆柱体，因此可以简化为二维平面，又因为平面模型的左右对称性，所以只需建立平面的 1/2 模型即可，其模型如图 14−1 所示。



图 14−1　锥阀模型简

14.2.2 材料参数

材料为纯水和水蒸气。其物理参数见表 14−1。

表 14−1　流体介质的计算参数

介 质 类 型	密度/kg/m^{-3}	动力粘度/Pas	汽化压力/Pa
水	1000	0.001	3540
水蒸气	0.02558	1.26E−06	

14.2.3 边界条件和载荷

本实例假设整个流动过程为准静态，因为水的流速较快，因此不考虑温度的影响。设定 3

个边界条件，即入口压力、出口压力、对称边界。入口压力为 1MPa，出口压力为大气压。

14.3 GUI 操作



14.3.1 创建流体分析系统

1．保存分析工程

GUI：File→Save，弹出“另存为”对话框，输入工程名字为“Cavitation analysis”，然后单击“保存”按钮。

2．创建流体分析系统

启动 Workbench，双击 Workbench 工具箱中的“Fluid Flow（Fluent）”，弹出如图 14-2 所示的“Fluent 流体分析”系统图。

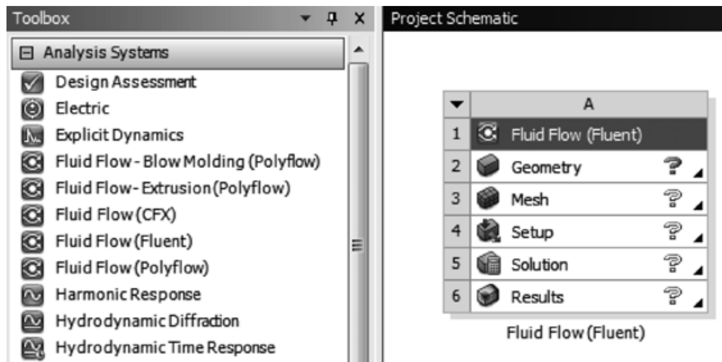


图 14-2 “Fluent 流体分析”系统图

14.3.2 建立几何模型

如图 14-3 所示，右击静态结构分析系统中的几何体选项，选择 Import Gemoetry→Browse，打开工作目录文件夹，选择锥阀模型文件，单击“OK”按钮。

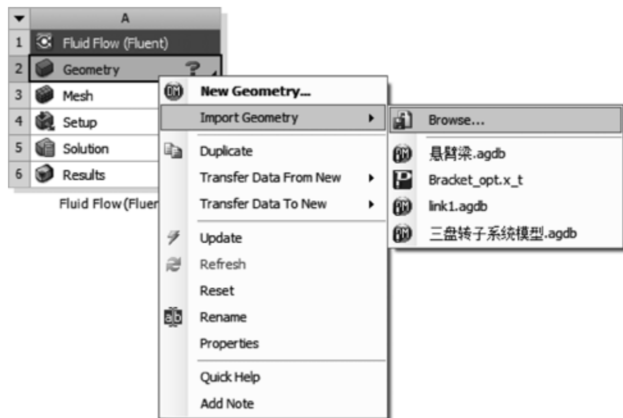


图 14-3 导入模型

14.3.3 划分网格

1．设置模型

双击流体分析系统中的“Mesh”按钮，进入流体动力学网格划分模块，单击 Geometry →Poppet valve，则在细节窗口出现如图 14-4 所示的“锥阀内流体材料细节”设置面板，然后将“Fluid/Solid”设置为“Fluid”。

2．为流体分析定义边界名称

这一步的操作用户可以参见本章的视频教程，将左侧入口命名为“pressure-inlet”，将右侧面命名为“pressure-outlet”，同时将对称边界命名为“sym”。

3．划分网格

单击“Mesh”按钮，弹出如图 14-5 所示的“网格划分细节”设置面板，将“Relevance Center”设置为“Fine”，然后右击“Mesh”按钮，选择“Generate Mesh”，右击“Project Schematicz”中流体分析的“Mesh”按钮，选择“Update”。

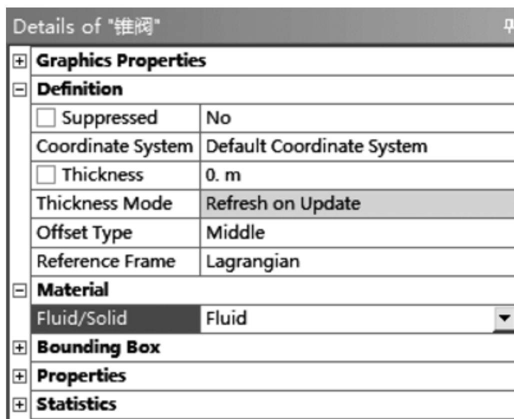


图 14-4 “锥阀内流体材料细节”设置面板

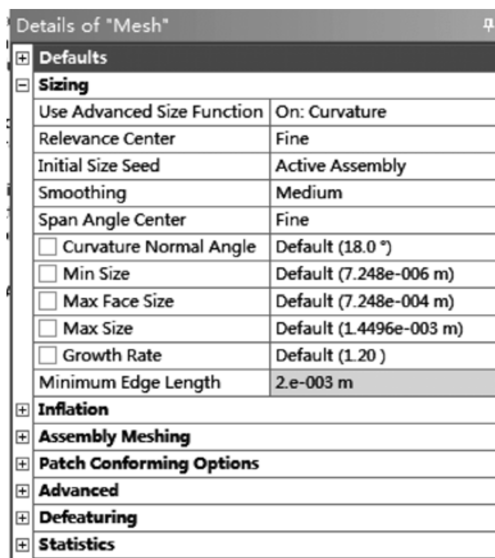


图 14-5 “网格划分细节”设置面板

14.3.4 流体动力学求解

1．进入 Fluent 系统

双击流体分析系统中的“Setup”按钮，弹出如图 14-6 所示的“Fluent 启动”设置面板，因为气穴计算是采用多相流进行计算，因此建议在 Option 中选择“Double-Precision”选项，设置“Processing Options”为并行处理，并设置为处理器的数量为“4”，保持默认设置并单击“OK”按钮。

2．设置流体模型

（1）选择多相流模型

GUI：Models→Multiphase→Edit，弹出如图 14-7 所示的“多相流模型”设置面板，

“Model”选择“Mixture”，然后不选用“Slip Velocity”。因为这个练习中涡流强烈不会有大的气泡产生，所以重力不重要，因此这里没有必要选择“Slip Velocity”。单击“OK”按钮关闭“Multiphase Model”对话框。

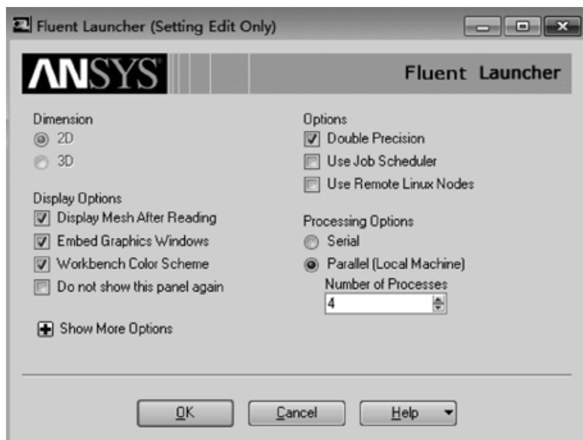


图 14-6 “Fluent 启动”设置面板

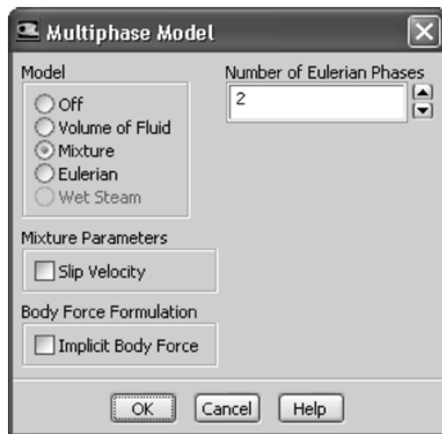


图 14-7 “Multiphase Model”对话框

（2）选择湍流模型

GUI：Models→Viscous→Edit，弹出如图 14-8 所示的“Viscous Model”对话框，在“Model”列表中选择“k-epsilon”。在“k-epsilon Model”列表选择“Realizable”，这种湍流模型比较适用于涡流比较明显的多相湍流计算。单击“OK”按钮关闭“Viscous Model”对话框。

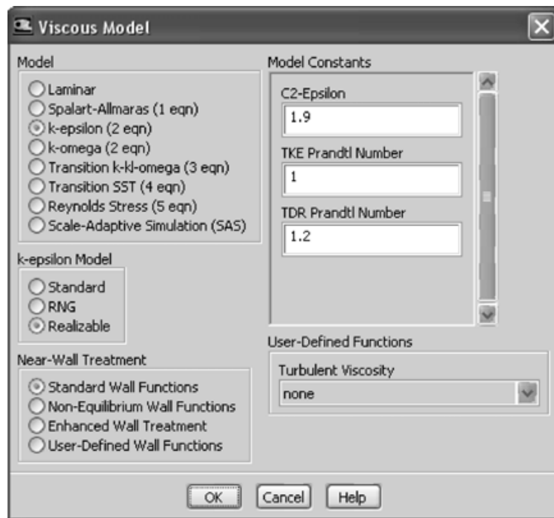


图 14-8 “Viscous Model”对话框

3．选择流体材料

GUI：Materials→ Fluid→ Create/Edit，弹出如图 14-9 所示的“Create/Edit Materials”对话框，在“Name”中输入“water”，输入 Density 为“1000”，Viscosity 为“0.001”，单击“Change/Create”按钮，继续在“Name”中输入“vapor”，输入 Density 为“0.02558”，Viscosity 为“1.26e-06”，单击“Change/Create”按钮。

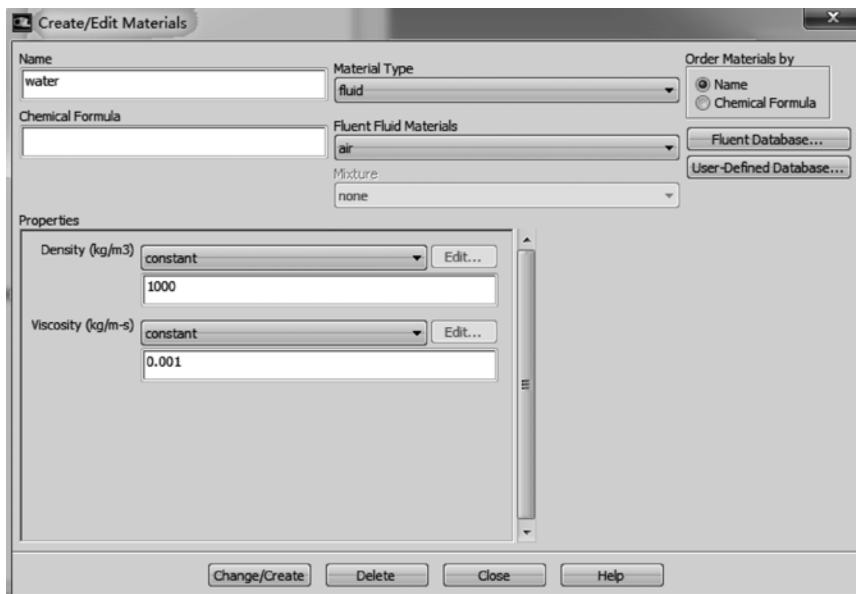


图 14-9 “Create/Edit Materials”对话框

4．相设置

GUI：Phases→Phase-1→Edit.，弹出如图 14-10 所示的“主相”设置面板，在“Name”中输入“liquid”，保持“Phase Material”下拉菜单中“Water”设置，单击“OK”按钮关闭对话框。

GUI：Phases→Phase-2→Edit...，弹出如图 14-11 所示的“次相”设置面板，在“Name”中输入“vapor”，从“Phase Material”下拉菜单中选择“vapor”，单击“OK”按钮关闭对话框。

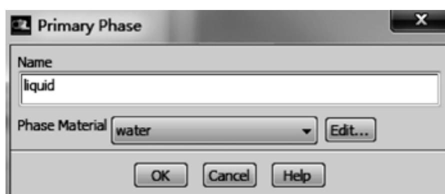


图 14-10 “主相”设置面板

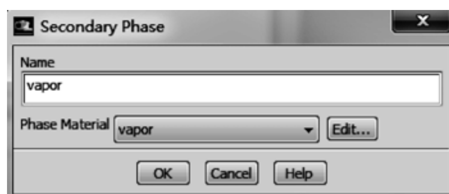


图 14-11 “次相”设置面板

GUI：Phases→Interaction...，弹出如图 14-12 所示的“相转变”设置面板，单击“Mass”标签。设置“Number of Mass Transfer Mechanisms”为“1”，在“Mass Transfer”中“From Phase”下拉菜单中选择“liquid”，在“To Phase”下拉菜单中选择“vapor”，在“Mechanism”下拉菜单中选择“cavitation”，则弹出如图 14-13 所示的“气化”设置面板。保持默认设置。注意“Vaporization Pressure”保持“3540Pa”，此为水在300K下的气化压力。需要注意气化压力随着温度的改变而改变。单击“OK”按钮关闭“Cavitation Model”对话框。

5．设置边界条件

（1）入口边界条件

GUI：Boundary Conditions→Pressure-inlet→Edit.，弹出如图 14-14 所示的“压力入口边

界条件”设置面板，设置 Gauge Total Pressure 为“1E6”，单击“OK”按钮关闭“Pressure Inlet”对话框。

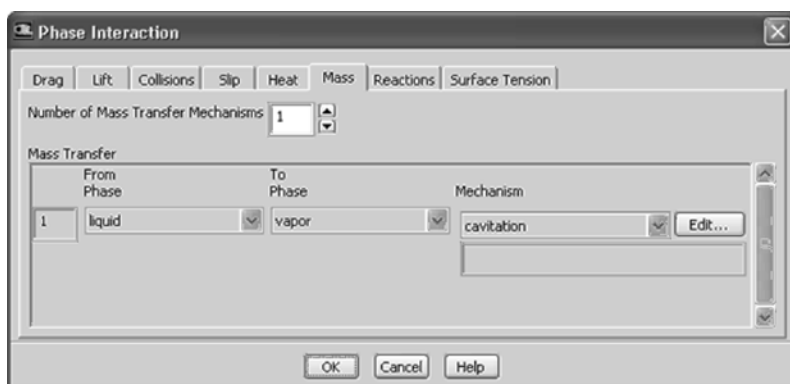


图 14-12 “相转变”设置面板

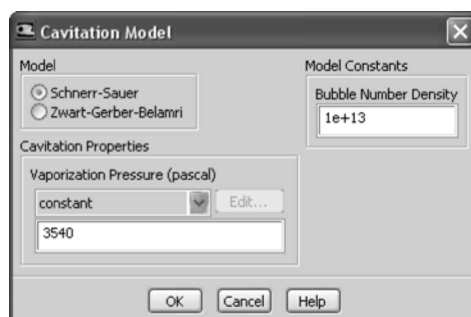


图 14-13 “气化”设置

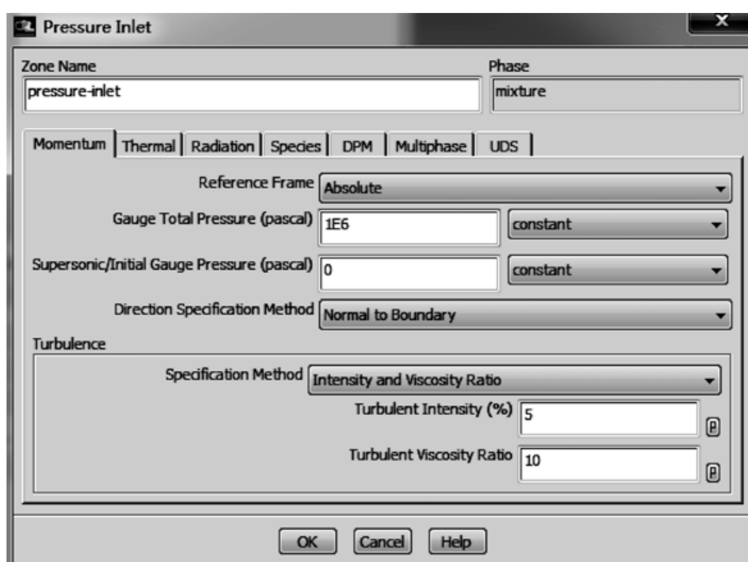


图 14-14 “压力入口边界条件”设置面板

（2）出口边界条件

GUI：Boundary Conditions→Pressure-outlet→Edit.，在弹出的“Pressure Outlet”对话框中的“Gauge Total Pressure”输入“0”，单击“OK”按钮关闭“Pressure Outlet”对话框。

（3）设置第二相的出口条件

GUI：Boundary Conditions→Pressure-outlet，从“Phase”下拉菜单中选择“vapor”，单击“Edit”弹出如图 14-15 所示的“压力出口边界条件”设置面板，单击“Multiphase”标签，保持“Backflow Volume Fraction”的设置为“0”，单击“OK”按钮关闭“Pressure Outlet”对话框。

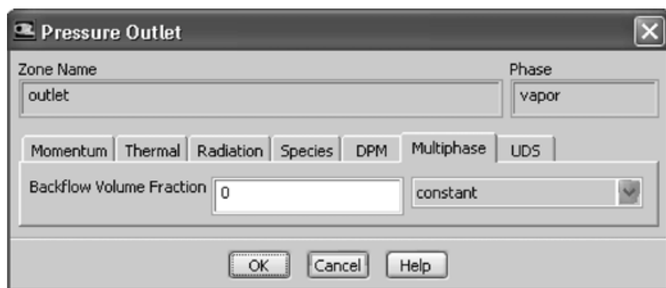


图 14-15 “压力出口边界条件”设置面板

6．计算

（1）设置计算参数

单击“Solution Methods”，弹出如图 14-16 所示的“求解方法”设置面板，将“Momentum”“Turbulent Kinetic Energy”和“Turbulent Dissipation Rate”都设置为“Second Order Upwind”，将“Volume Fraction”设为“First Order Upwind”。

（2）设置计算控制

单击“Solution Controls”，弹出如图 14-17 所示的“求解控制参数”设置面板，在“Under-Relaxation Factors”中将“Pressure”设为“0.5”。

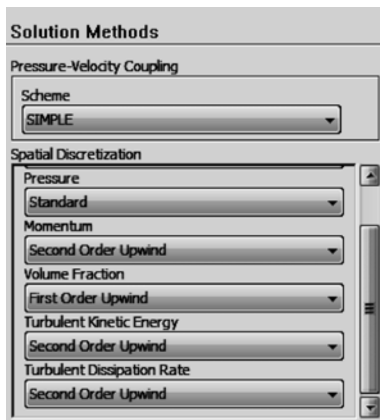


图 14-16 “求解方法”设置面板

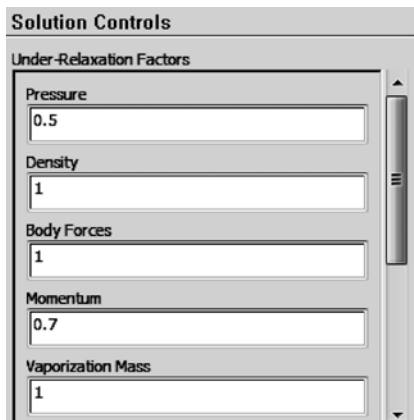


图 14-17 “求解控制参数”设置面板

（3）初始化计算

单击“ Solution Initialization”，在“Initialization Methods”中选择“Standard Initialization”，

单击“Initialize”按钮，初始化计算。

（4）开始计算

单击“Run Calculation”，弹出如图 14-18 所示的“开始计算”设置面板，在“Number of Iteration”中输入“100”。单击“Calculate”按钮开始计算。

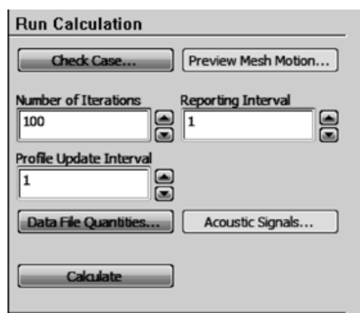


图 14-18 “开始计算”设置面板

7. 查看结果

图 14-19 和图 14-20 分别给出了液体、气体的体积分数云图和流场的压力云图，图 14-21 为流场的压力云图具体的查看方法读者可以参见本章的视频教程。

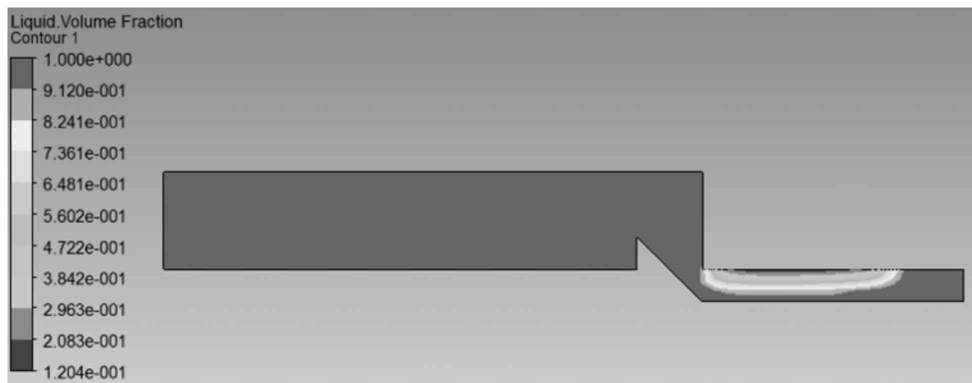


图 14-19 液体的体积分数云图



图 14-20 气体的体积分数云图

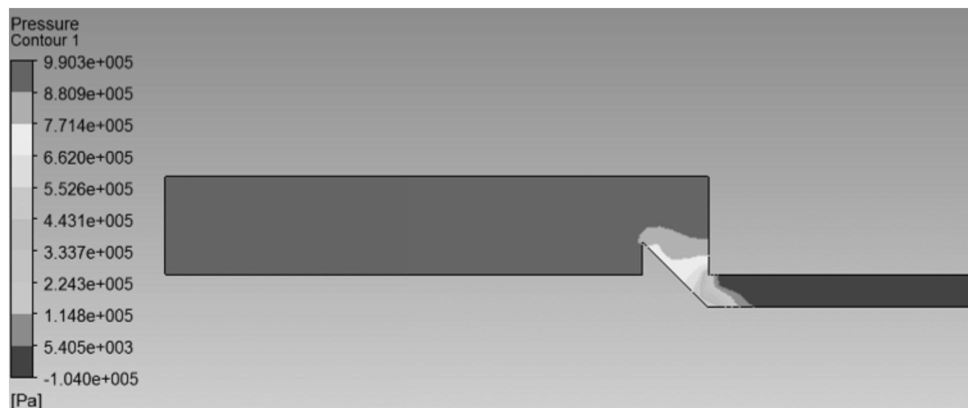


图 14-21　流场的压力云图

第 15 例　推力轴承承载能力分析



15.1　实例覆盖的知识点

读者通过学习该实例可以掌握如下 Workbench 的知识点。

1）使用 Fluent 进行气穴分析的基本步骤。

2）设置 Fluent 多相流的方法。

3）设置不同流体相相互作用。

4）Fluent 流体计算控制设置方法。

5）激活流体湍流模型的方法。

6）创建周期边界条件的方法。

15.2　问题的描述

15.2.1 几何模型

固定瓦块阶梯面推力轴承结构简单，主要用于小型轴承。因为固定瓦块阶梯面推力轴承工作端面上的台阶是以轴承轴线为中心的周向周期性分布，因此可以单独取出一个周期性区域作为计算区域进行计算，理论上各个周期性区域的流场是相同的。本实例中端面开槽数为 9，则可以选择整个工作端面的 1/9 份，即一个槽区和与之相连的坝区作为计算区域，图 15-1 给出了固定瓦块阶梯面推力轴承的模型。

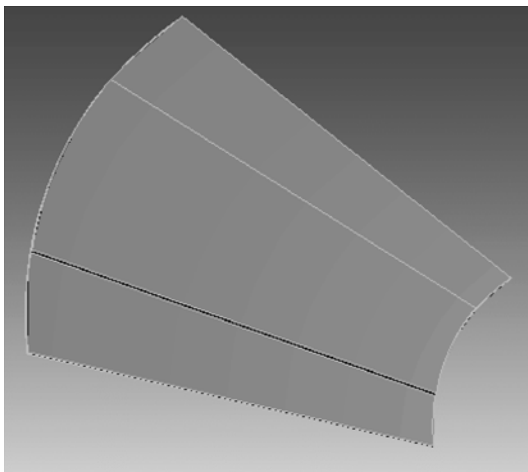


图 15-1　固定瓦块阶梯面推力轴承模型

15.2.2 材料参数

润滑材料为润滑油，其主要物理参数为：密度 885kg/m^3；动力粘度 0.066Pa.s。

15.2.3 边界条件和载荷

本实例假设整个流动过程为定常流动，即为静力学分析并且不考虑温度的影响。有两个边界条件，即入口压力和出口压力。入口压力为 1.5MPa，出口压力为大气压。轴的转速为 600rad/s。

15.3 GUI 操作

15.3.1 创建流体分析系统

1．保存分析工程

GUI：File→Save，弹出“另存为”对话框，输入工程名字为“Thrust bearing capacity analysis”，然后单击“保存”按钮。

2．创建流体分析系统

启动 Workbench，双击 Workbench 工具箱中的“Fluid Flow（Fluent）”，弹出如图 15-2 所示的“Fluent 流体分析”系统图。

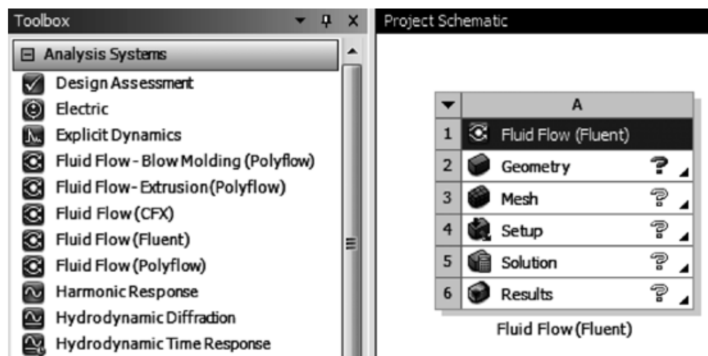


图 15-2 “Fluent 流体分析”系统图

15.3.2 建立几何模型

如图 15-3 所示，右击静态结构分析系统中的几何体选项，选择 Import Gemoetry→Browse，打开工作目录文件夹，选择推力轴承模型文件，单击“OK”按钮。

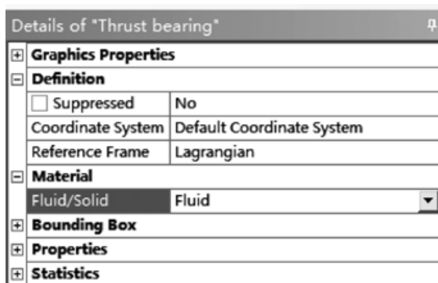
15.3.3 划分网格

1．设置模型

双击流体分析系统中的“Mesh”按钮，进入流体动力学网格划分模块，单击 Geometry→推力轴承，则在细节窗口出现如图 15-4 所示的“推力轴承内流体材料细节”设置面板，然后将“Fluid/Solid”设置为“Fluid”。



图 15-3 导入模型



Details of "Thrust bearing"	
Graphics Properties	
Definition	
Suppressed	No
Coordinate System	Default Coordinate System
Reference Frame	Lagrangian
Material	
Fluid/Solid	Fluid
Bounding Box	
Properties	
Statistics	

图 15-4 “推力轴承内流体材料细节”设置面板

2．为流体分析定义边界名称

这一步的操作用户可以参见本章的视频教程，图 15-5 给出了流体边界条件位置示意图，即将轴承的内侧面命名为“pressure-inlet”，将轴承的外侧命名为“pressure-outlet”，将轴承模型的大扇形表面命名为“wall-move”，此外将周向上的两个端面命名为“periodic-1”和“periodic-2”。

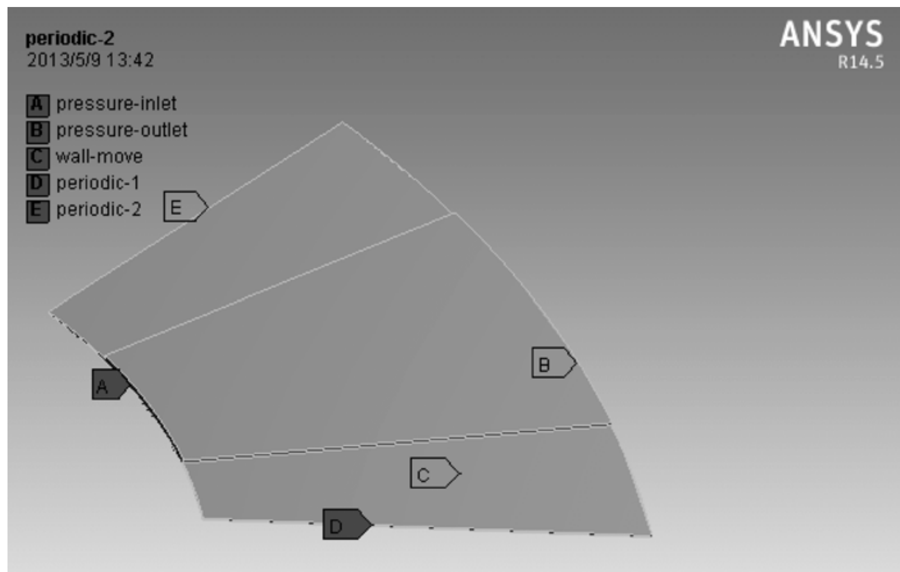


图 15-5 流体边界条件位置示意图

3．划分网格

单击“Mesh”按钮，弹出如图 15-6 所示的“网格划分细节”设置面板，设置“Relevance Center”为“Fine”，其他保持默认设置，然后右击“Mesh”按钮，选择“Generate Mesh”。

15.3.4 流体动力学求解

1．进入 Fluent 系统

双击流体分析系统中的“Setup”按钮，弹出如图 15-7 所示的“Fluent 启动”设置面

板，选择“Double-Precision”选项，“Processing Options”选择“Parallel”，并设置“Number of Processes”数量为“4”，保持默认设置单击“OK”按钮。

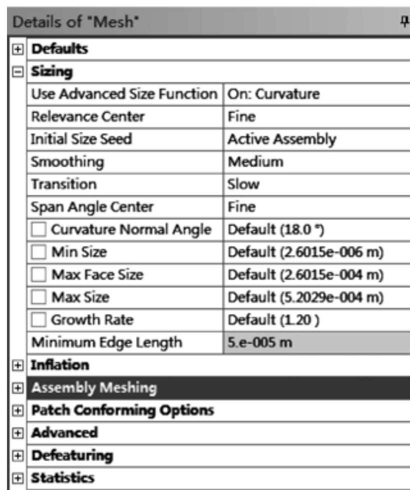


图 15-6 “网格划分细节”设置面板

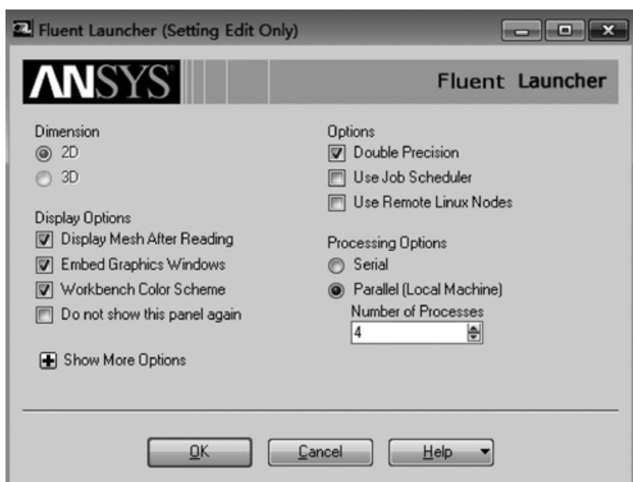


图 15-7 “Fluent 启动”设置面板

2．设置流体模型

GUI：Models→Viscous→Edit，弹出如图 15-8 所示的“流体粘性模型”设置面板，在“Model”列表中选择“k-epsilon”，保持默认设置。单击“OK”按钮关闭该面板。

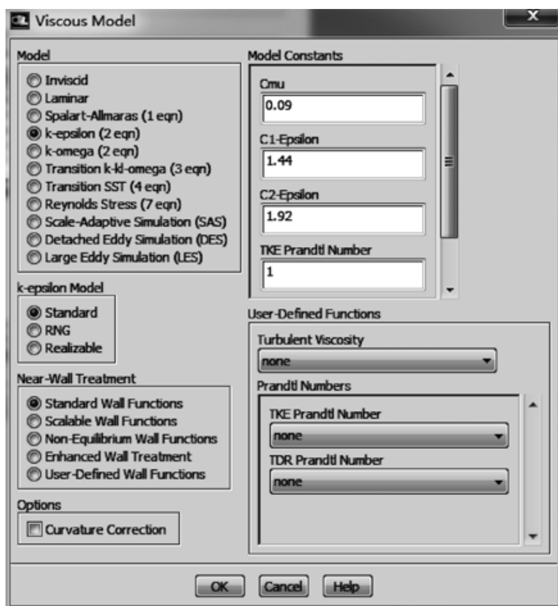


图 15-8 “流体粘性模型”设置面板

3．设置流体材料

GUI：Materials→Fluid→Create/Edit.，弹出如图 15-9 所示的“创建/修改材料参数”设置面板，在“Name”中输入“oil”，在“Density”中输入“885”，在“Viscosity”中输入

“0.066”，单击“Change/Create”按钮关闭该对话框。

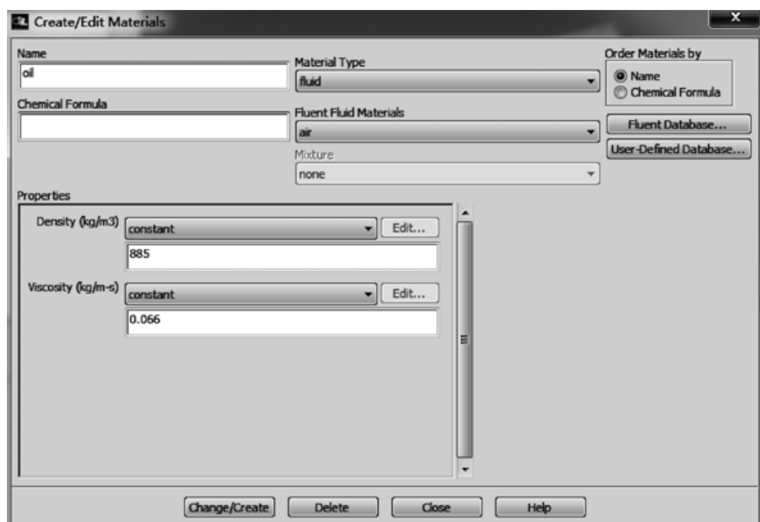


图 15-9 “创建/修改材料参数”设置面板

4．设置流体区域

GUI：Cell Zone Conditions→Zone→thrust_bearing.→ Edit，在弹出的“Fluid”对话框中的“Material Name”中选择“Oil”，单击“OK”按钮关闭该对话框。

5．设置边界条件

（1）入口边界条件

GUI：Boundary Conditions→pressure-inlet→Edit，弹出如图 15-10 所示的“压力入口边界”设置面板，输入 Gauge Total Pressure 为“1.5e6”，输入 Turbulent Intensity 为“10%”，单击“OK”按钮。

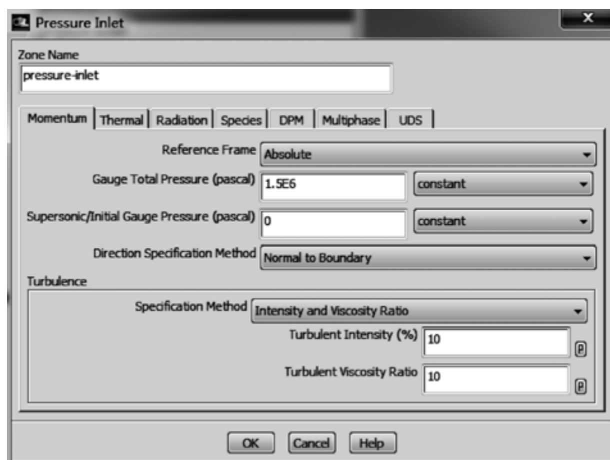


图 15-10 “压力入口边界”设置面板

（2）出口边界条件

GUI：Boundary Conditions→pressure-outlet→Edit，弹出如图 15-11 所示的“压力出口边界条件”设置面板，输入 Gauge Total Pressure 为“0”，Backflow Turbulent Kinetic Energy 为

“10%”，单击“OK”按钮。

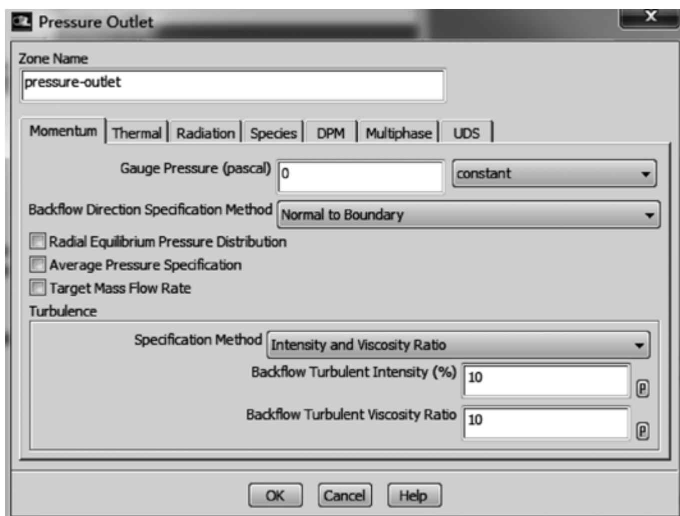


图 15-11 “压力出口边界条件”设置面板

（3）设置周期性条件

在 TUI 中用下面命令指定/mesh/modify-zones/make-periodic，之后会询问一系列设置：“Periodic zone [()]”中输入“Periodic-1”；“Shadow zone [()]”中，输入“Periodic-2”；“Rotational periodic? (if no, translational) [yes]”中输入“yes”；“Create periodic zones? [yes]”中，输入“yes”。

（4）运动墙壁边界条件

GUI：Boundary Conditions→wall-move→Edit，弹出如图 15-12 所示的“壁面边界条件”

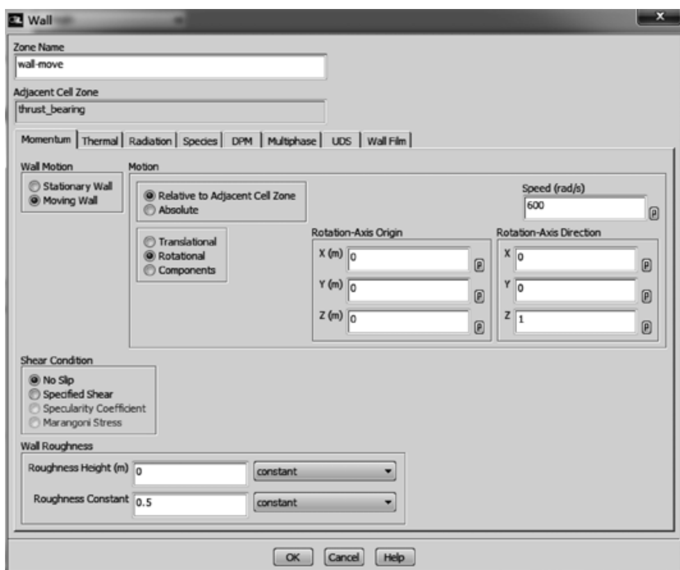


图 15-12 “壁面边界条件”设置面板

设置面板，设置“Wall Motion”为“Moving Wall”，在“Motion”中的选项里分别选择“Absolute”和“Rotational”，并且输入 Speed 为“600”，确定在“Rotation-Axis Direction”中“Z”的数值为“1.”，单击“OK”按钮。



6．计算

（1）设置计算参数

单击“Solution Methods”按钮，则出现如图 15-13 所示的“求解方法”设置面板，将“Momentum”“Turbulent Kinetic Energy”和“Turbulent Dissipation Rate”都设置为“Second Order Upwind”。

（2）设置计算控制

单击“Solution Controls”按钮，出现如图 15-14 所示的“求解控制参数”设置面板，在“Under-Relaxation Factors”中将“Pressure”设置为“0.5”，将“Momentum”置为“0.7”，对于流场情况简单或者压力梯度变化不大的计算可以适当提高“under-relaxation factors”的取值，其取值范围为 0.001～1。

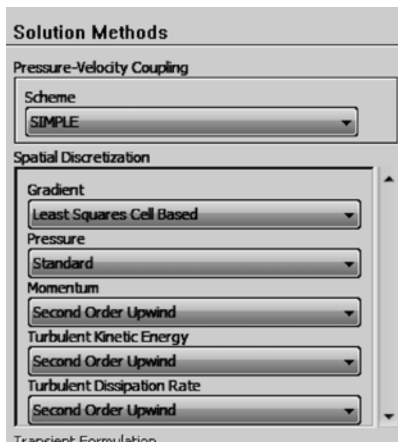


图 15-13 “求解方法”设置面板，

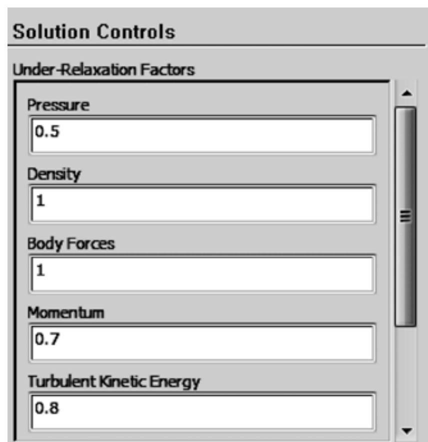


图 15-14 “求解控制参数”设置面板

（3）初始化计算

单击“Solution Initialization”按钮，在“Initialization Methods”中选择“Hybrid Initialization”，单击“Initialize”按钮初始化计算。对于比较复杂的流场，“Hybrid Initialization”可以比“Standard Initialization”提供更好地初始化速度和压力场，这将在一定程度上改善求解器的收敛性。

（4）开始计算

单击“Run Calculation”按钮，在“Number of Iteration”中输入“400”，单击“Calculate”按钮开始计算。

7．查看结果

图 15-15 和图 15-16 分别给出了推力轴承的压力和流场速度云图，图 15-17 给出了完整的推力轴承内流场的湍流动能云图，图 15-18 给出了推力轴承推力，具体查看方法，读者可以参见本章的视频的教程。

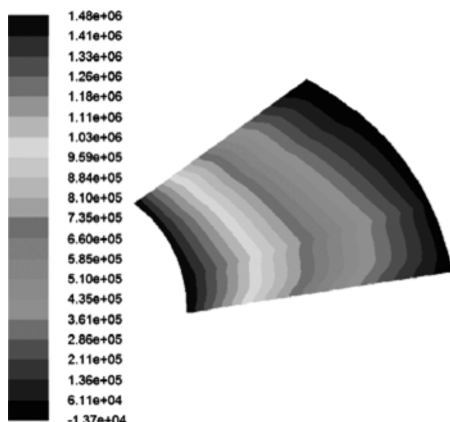


图 15-15　推力轴承的压力云图

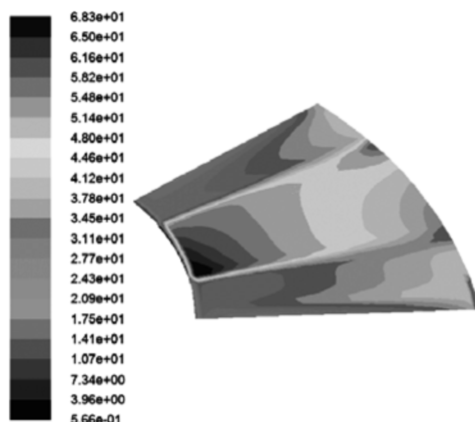


图 15-16　推力轴承的流场速度云图

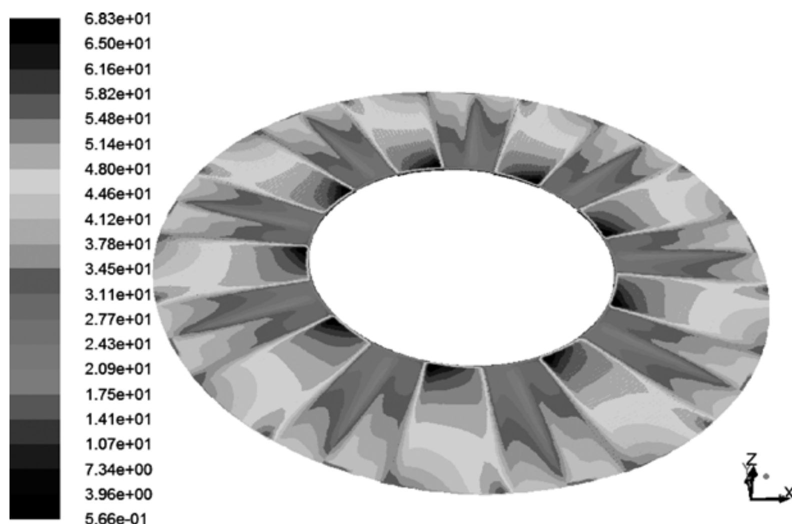


图 15-17　完整的推力轴承内流场的湍流动能云图

Forces - Direction Vector (0 0 1)

	Forces (n)			Coefficients	
Zone	Pressure	Viscous	Total	Pressure	Viscous
wall-move	59.067097	0	59.067097	96.436076	0
Net	59.067097	0	59.067097	96.436076	0

图 15-18　推力轴承推力列表

第 16 例　泵壳的稳态热应力分析



16.1　实例覆盖的知识点

读者通过学习该实例可以掌握如下 Workbench 的知识点。

1）基于 Workbench 的稳态热应力分析基本步骤。

2）定义温度载荷的方法。

3）定义对流换热系数的方法。

4）设置模型材料参数的方法。

5）定义圆柱支撑约束的方法。

16.2　问题的描述

16.2.1　几何模型

图 16-1 给出了泵壳的三维模型，泵壳模型使用 CAD 软件已经建立好，用户只需将其导入 Workbench 中即可。

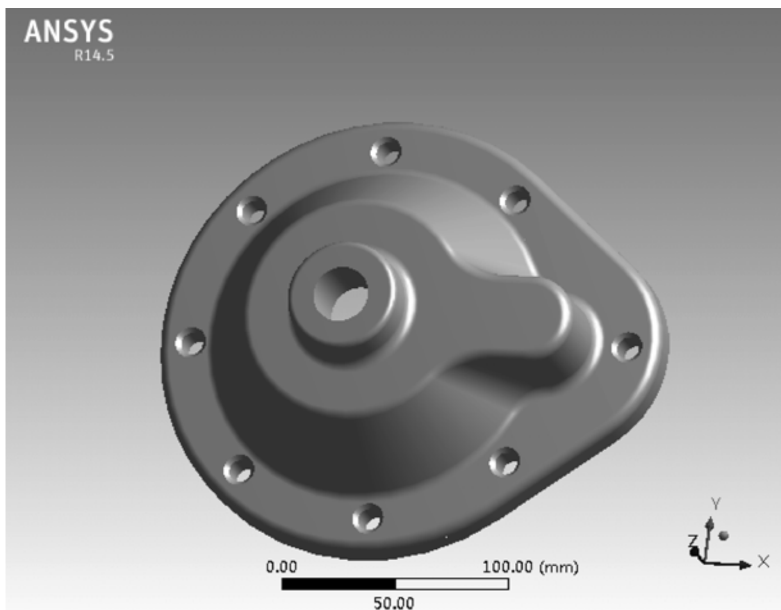


图 16-1　泵壳的三维模型

16.2.2 材料参数

该泵壳体的材料为结构钢，弹性模量为 2.1E11Pa，泊松比为 0.31，导热系数为 75W/(m·K^{-1})，热膨胀系数为 1.7E-5。

16.2.3 边界条件和载荷

1．热分析边界条件

泵壳是安装在常温 75°C 的泵，假设接触面保持这个温度，泵内的流体温度为 300°C，泵的内表面与流体进行对流换热，其对流换热系数为 100 W/(m^2·/℃$^{-1}$)，泵体的外表面与空气的对流换热系数为 20 W/(m^2·/℃$^{-1}$)，空气的温度为 20℃。

2．结构分析边界条件

泵壳通过螺栓安装在泵体上，因此在泵壳外围的螺栓孔表面施加圆柱支撑，并约束 3 个方向的位移，泵壳的中间圆孔内表面也施加圆柱支撑，但轴向位移自由，热应力的参考温度为 20℃。

16.3 GUI 操作

16.3.1 建立稳态热应力分析系统

启动 Workbench，双击 Workbench 工具箱中的“用户系统-Thermal-Stress”，弹出如图 16-2 所示的“稳态热应力分析系统”工程图，由图可知，稳态热应力分析系统由稳态热分析系统和静态结构分析系统组成。

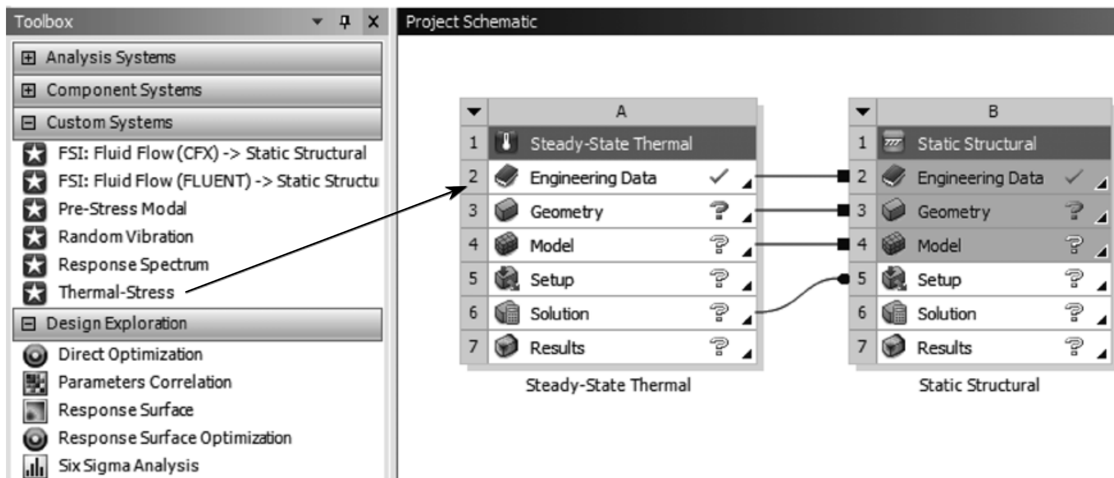


图 16-2 “稳态热应力分析系统”工程图

16.3.2 定义材料数据

单击静态结构分析系统中的“Engineering Data”子模块，选择“Structural Steel”上的结

构钢选项，弹出如图 16-3 所示的结构钢材料数据列表，重新输入热膨胀系数为“1.7E-5”，参考温度为“20”，杨氏模量设置为“2.1E11”，泊松比为“0.31”，导热系数为“75”，然后选择“Update Project”选项，最后单击“Return to Project”按钮。

Properties of Outline Row 3: Structural Steel

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Density	7850	kg m^-3		
3	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion				
4	Coefficient of Thermal Expansion	1.7E-05	C^-1		
5	Reference Temperature	20	C		
6	Isotropic Elasticity				
7	Derive from	Young's M...			
8	Young's Modulus	2.1E+11	Pa		
9	Poisson's Ratio	0.31			
10	Bulk Modulus	1.8421E+11	Pa		
11	Shear Modulus	8.0153E+10	Pa		
12	Alternating Stress Mean Stress	Tabular			
16	Strain-Life Parameters				
24	Tensile Yield Strength	2.5E+08	Pa		
25	Compressive Yield Strength	2.5E+08	Pa		
26	Tensile Ultimate Strength	4.6E+08	Pa		
27	Compressive Ultimate Strength	0	Pa		
28	Isotropic Thermal Conductivity	75	W m^-1 ...		

图 16-3 结构钢材料数据列表

16.3.3 建立几何模型

如图 16-4 所示，右击静态结构分析系统中的几何体选项，选择 Import Geometry→Browse，打开工作目录文件夹，选择泵壳模型文件，单击“OK”按钮。

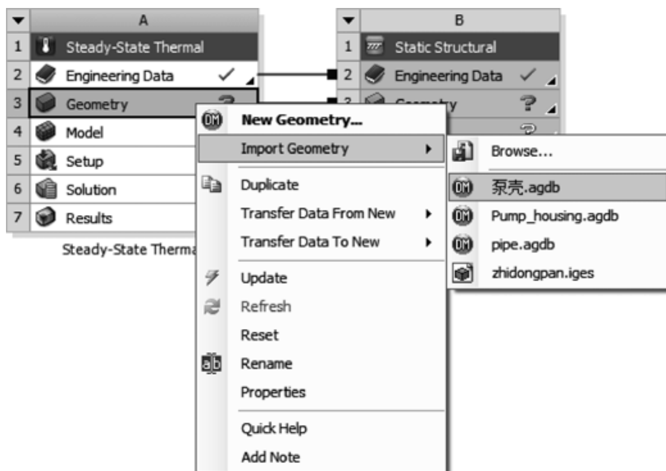


图 16-4 导入模型

16.3.4 创建有限元模型

选择稳态热应力分析系统中的热分析中的“Modal”选项，进入“Multiple Systems”，图 16-5 给出了“稳态热应力分析”流程图，即首先进行稳态热分析，获得模型的稳态温度场，然后将该温度场作为体载荷施加到下一步的静力学结构分析中。

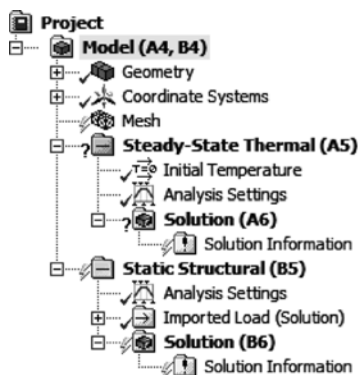


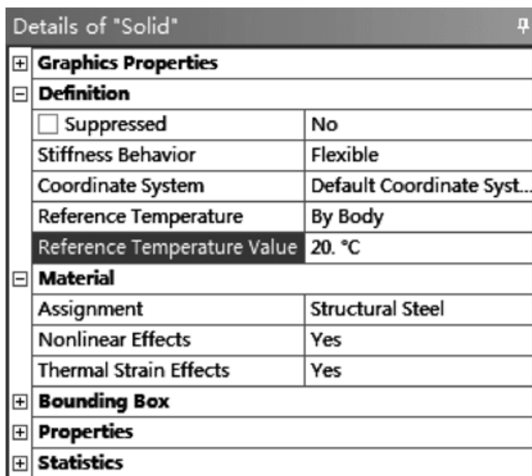
图 16-5 “稳态热应力分析”流程图

1．为泵壳赋予材料

单击 Model→Geometry→Solid，则弹出如图 16-6 所示的“泵壳细节”设置面板，用户一般只需设置该面板的两个子选项，即“Definition”和“Material”选项即可。在定义选项中，用户可以设置模型的“Stiffness Behavior”“Coordinate System”和“Reference Temperature”，在材料选项中可以为模型指定“Assignment”，本实例选用材料为“Structural Steel”，设置热应力计算的参考温度的施加方式为“By Body”，参考温度值为“20”。

2．网格划分

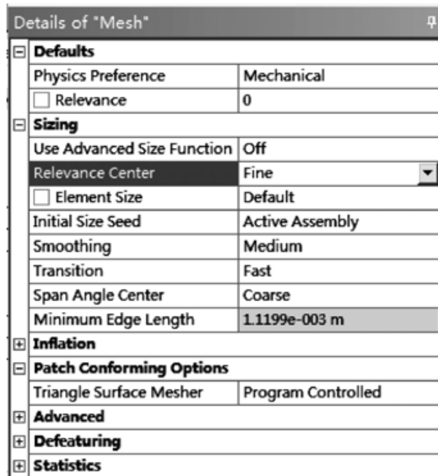
单击“Mesh”按钮，弹出如图 16-7 所示的“网格划分细节”设置面板，设置“Relevance Center”为最“Fine”，其他保持默认设置，然后右击“Mesh”按钮，选择“Generate Mesh”。



Details of "Solid"

Graphics Properties	
Definition	
Suppressed	No
Stiffness Behavior	Flexible
Coordinate System	Default Coordinate Syst...
Reference Temperature	By Body
Reference Temperature Value	20. °C
Material	
Assignment	Structural Steel
Nonlinear Effects	Yes
Thermal Strain Effects	Yes
Bounding Box	
Properties	
Statistics	

图 16-6 “泵壳细节”设置面板



Details of "Mesh"

Defaults	
Physics Preference	Mechanical
Relevance	0
Sizing	
Use Advanced Size Function	Off
Relevance Center	Fine
Element Size	Default
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	Medium
Transition	Fast
Span Angle Center	Coarse
Minimum Edge Length	1.1199e-003 m
Inflation	
Patch Conforming Options	
Triangle Surface Mesher	Program Controlled
Advanced	
Defeaturing	
Statistics	

图 16-7 “网格划分细节”设置面板

16.3.5 稳态热分析

1．定义泵壳的配合面上的温度

右击“Steady-State Thermal”，按照图 16-8 所示选择 Insert→Temperature，在细节窗口出现如图 16-9 所示的“温度细节”设置面板，选择泵壳的配合面，单击“Apply”按钮，输入温度值为“75”。

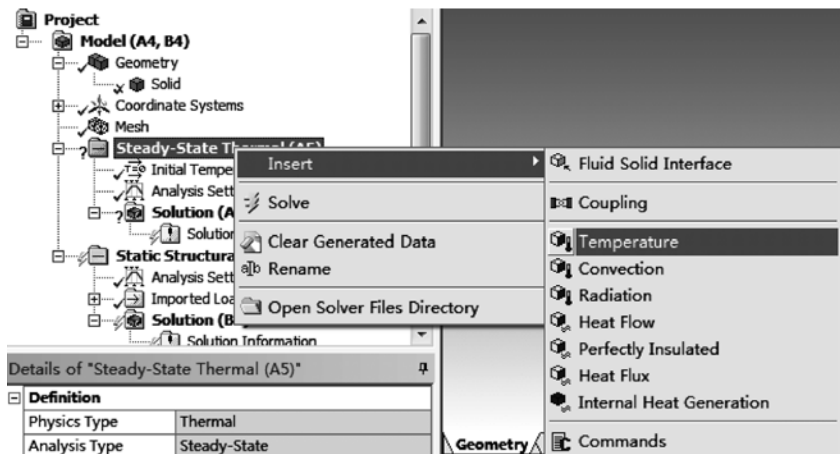


图 16-8 “定义温度路径”示意图

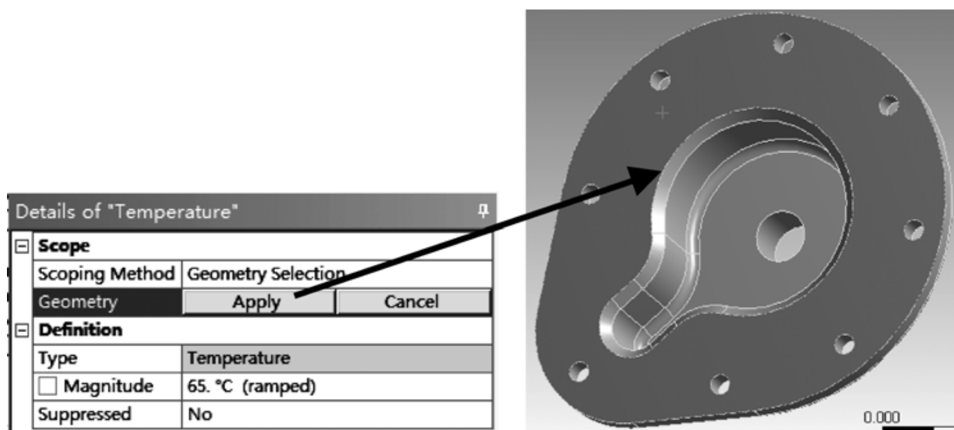


图 16-9 “温度细节”设置面板

2．定义泵壳内表面的对流换热

右击“Steady-State Thermal”，按照图 16-10 所示选择 Insert→Convection，在细节窗口出现如图 16-11 所示的“对流换热细节”设置面板，选择泵壳的内表面，单击“Apply”按钮，输入温度值“Film Coefficient”为“100”，“Ambient Temperature”为“300”。

3．定义泵壳外表面的对流换热

右击“Steady-State Thermal”，按照图 16-10 所示选择 Insert→Convection，在细节窗口出现如图 16-12 所示的“对流换热细节”设置面板，选择泵壳的外表面，单击“Apply”按

钮，输入温度值“Film Coefficient”为“20”，“Ambient Temperature”为“20”。

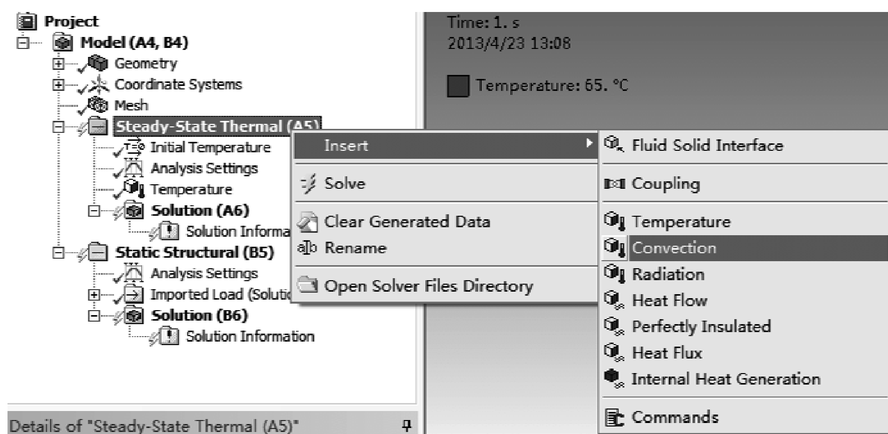


图 16-10　定义对流路径示意图

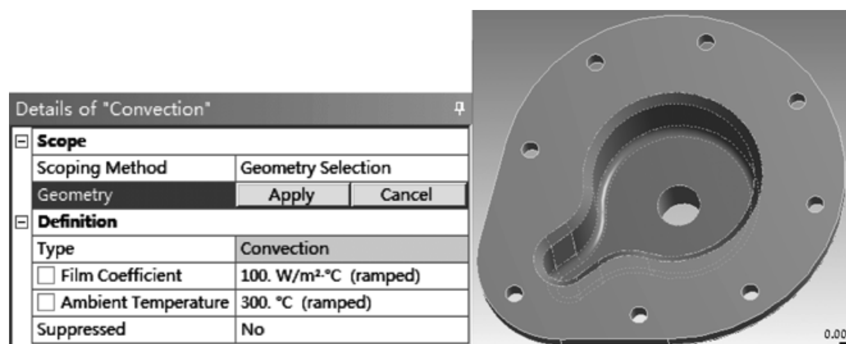


图 16-11　“对流换热细节”设置面板 1

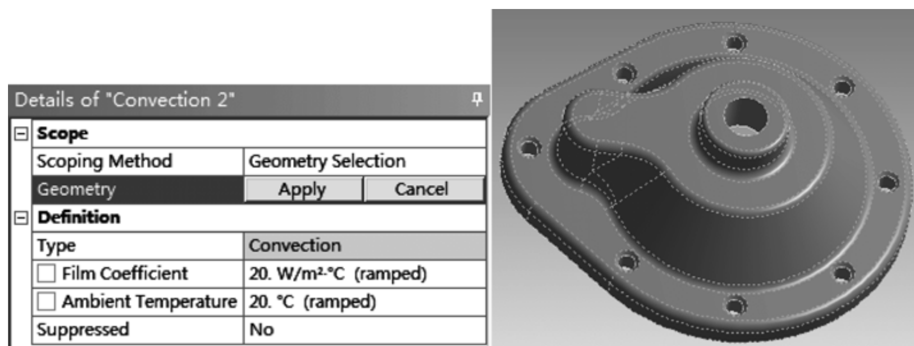


图 16-12　“对流换热细节”设置面板 2

4．求解

选择 Steady-State Thermal→Solution，右击“Solution”，选择“Solve”。

5．观察结果

图 16-13 和图 16-14 分别给出了泵壳的温度与热通量矢量云图，具体查看方法，读者可以参见本章的视频教程。

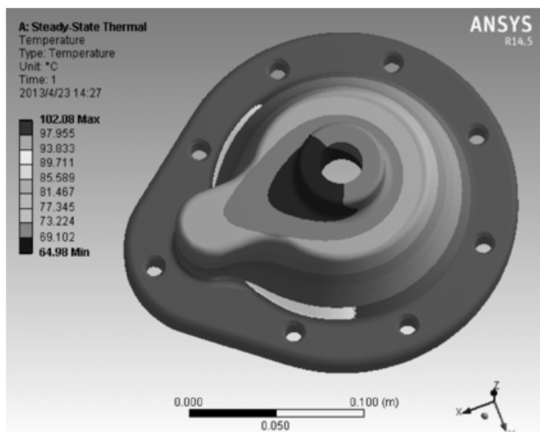


图 16-13　泵壳的温度云图

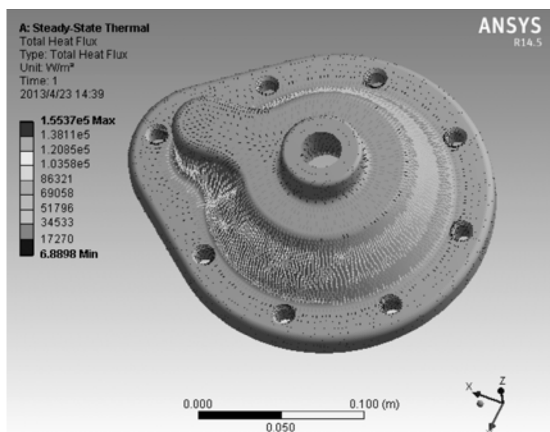
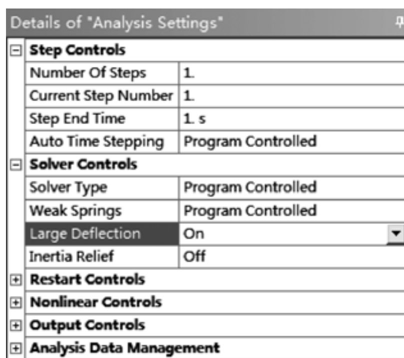


图 16-14　泵壳的热通量矢量云图

16.3.6 静力学求解

1．静力学基本设置

单击“Static Structural”下方的“Analysis Settings”，则会出现如图 16-15 所示的“静力学求解分析设置”细节面板，设置“Large Deflection”为“ON”，表明激活了大变形。



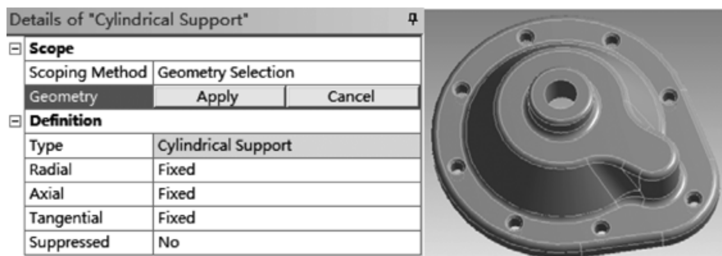
Details of "Analysis Settings"

Step Controls	
Number Of Steps	1.
Current Step Number	1.
Step End Time	1. s
Auto Time Stepping	Program Controlled
Solver Controls	
Solver Type	Program Controlled
Weak Springs	Program Controlled
Large Deflection	On
Inertia Relief	Off
Restart Controls	
Nonlinear Controls	
Output Controls	
Analysis Data Management	

图 16-15　“静力学求解分析设置”细节面板

2．定义泵壳外圈螺栓孔位移约束

右击“Static Structural”，选择 Insert→Cylindrical，在细节窗口出现如图 16-16 所示的“圆柱支撑细节”设置面板，选择泵壳外圈螺栓孔，单击“Apply”按钮，其他设置按照图 16-16 进行设置。



Details of "Cylindrical Support"

Scope		
Scoping Method	Geometry Selection	
Geometry	Apply	Cancel
Definition		
Type	Cylindrical Support	
Radial	Fixed	
Axial	Fixed	
Tangential	Fixed	
Suppressed	No	

图 16-16　“圆柱支撑细节”设置面板

3．定义泵壳中间圆孔位移约束

右击“Static Structural”，选择 Insert→Cylindrical，则在细节窗口出现如图 16-17 所示的“圆柱支撑细节”设置面板，选择泵壳外圈螺栓孔，单击“Apply”按钮，其他设置按照图 16-17 进行设置。

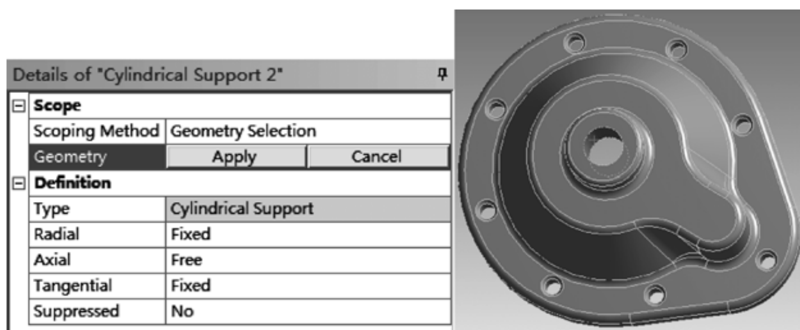


图 16-17 “圆柱支撑细节”设置面板

4．求解

选择 Static Structural→Solution，右击“Solution”，选择“Solve”。

5．观察结果

图 16-18 和图 16-19 分别给出了泵壳的等效应力和总体变形云图，具体查看方法用户可以参见本章视频教程。

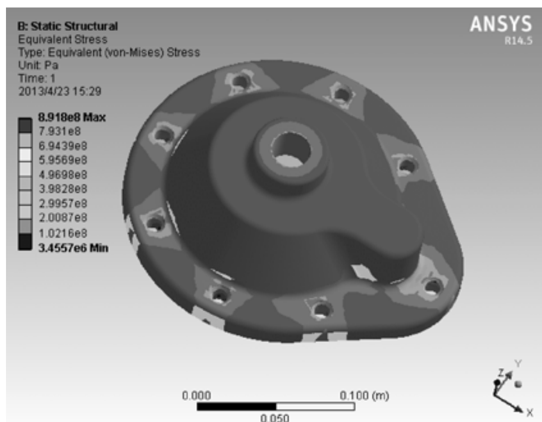


图 16-18 泵壳的等效应力云图

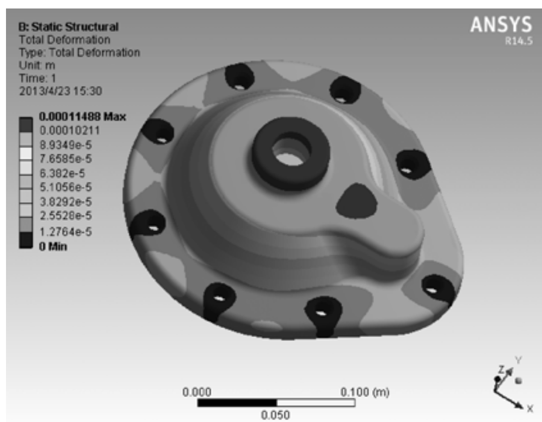


图 16-19 泵壳的变形云图

第 17 例　斜齿轮-齿条装配体的模态分析



17.1　实例覆盖的知识点

读者通过学习该实例可以掌握如下 Workbench 的知识点。

1）Workbench 进行模态分析的基本步骤。

2）定义装配体连接关系的方法。

3）定义装配体之间的运动副连接关系方法。

4）模态求解设置的基本方法。

5）查看模态振型的方法。

17.2　问题的描述

17.2.1 几何模型

图 17-1 给出了斜齿轮-齿条装配体三维模型图，该模型由带斜齿的齿条和斜齿轮组成。

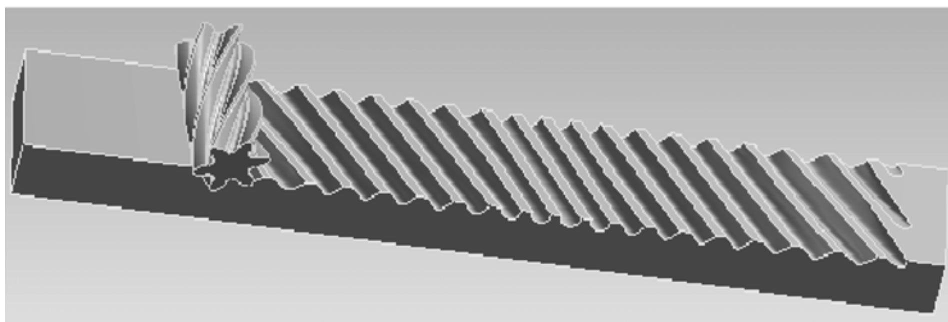


图 17-1　斜齿轮-齿条装配体三维模型图

17.2.2 材料参数

该装配体的材料为结构钢，斜齿轮和齿条的弹性模量都为 2.1E11Pa，泊松比为 0.31，密度为 7300kg/m^3。

17.2.3 边界条件和载荷

完全固定约束齿条的底面，斜齿轮可以绕自身轴线自由转动。

17.3 GUI 操作

17.3.1 建立模态分析系统

启动 Workbench，双击 Workbench 工具箱中的“Modal”，弹出如图 17-2 所示的“模态分析系统”工程图。

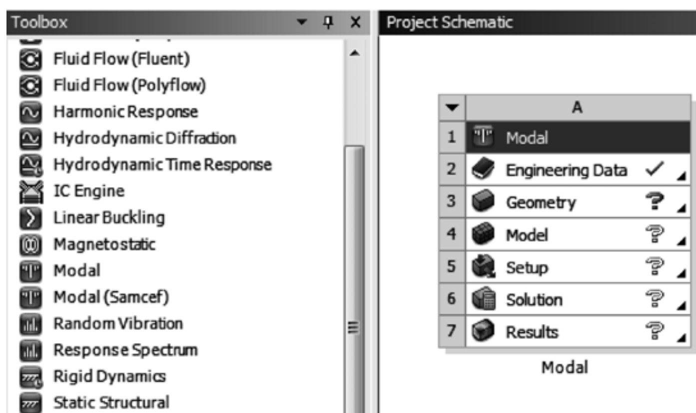


图 17-2 “模态分析系统”工程图

17.3.2 定义材料数据

单击模态分析系统中的“Engineering Data”子模块，选择“Structural Steel”上的结构钢选项，弹出如图 17-3 所示的“结构钢材料”数据列表，将密度修改为“7300”，杨氏模量为“2.1E11”，泊松比为“0.31”，然后单击“Update Project”，最后单击“Return to Project”按钮。

Properties of Outline Row 3: Structural Steel

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Density	7300	kg m^-3		
3	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion				
4	Coefficient of Thermal Expansion	1.2E-05	C^-1		
5	Reference Temperature	22	C		
6	Isotropic Elasticity				
7	Derive from	Young's M...			
8	Young's Modulus	2.1E+11	Pa		
9	Poisson's Ratio	0.31			
10	Bulk Modulus	1.8421E+11	Pa		
11	Shear Modulus	8.0153E+10	Pa		

图 17-3 “结构钢材料”数据列表

17.3.3 建立几何模型

如图 17-4 所示，右击模态分析系统中的几何体选项，选择 Import Geometry→Browse，打开工作目录文件夹，选择斜齿轮-齿条模型文件，单击“OK”按钮。

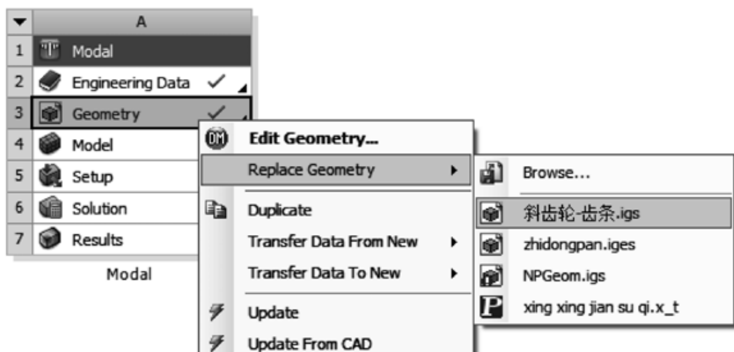


图 17-4 导入模型

17.3.4 创建有限元模型

选择预应力模态分析系统中的结构分析中的“Modal”选项，进入“Multiple Systems”，图 17-5 给出了“预应力模态分析”流程图。

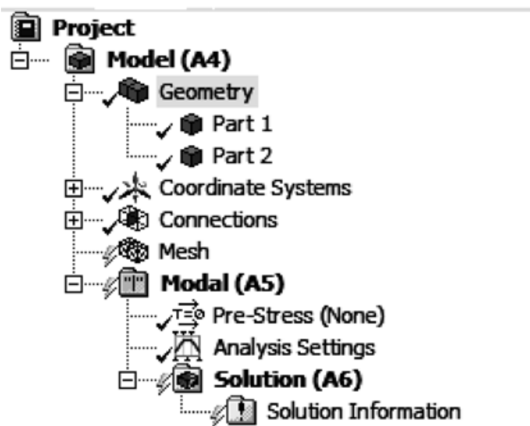


图 17-5 “预应力模态分析”流程图

1．为斜齿轮-齿条赋予材料

单击 Model→Geometry→Part1，则弹出如图 17-6 所示的“Part1 细节”设置面板，用户一般只需设置该面板的两个子选项，即“Definition”和“Material”选项即可。在定义选项中，用户可以设置模型的“Stiffness Behavior”“Coordinate System”和“Reference Temperature”，在材料选项中可以为模型指定“Assignment”，本实例选用材料为“Structural Steel”，按照图样操作为 Part2 赋予结构钢材料。

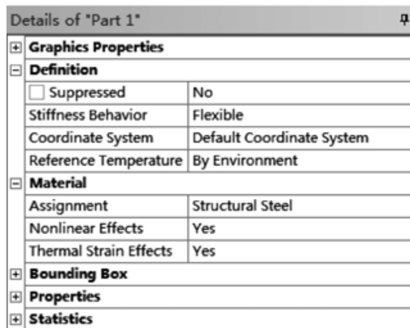


图 17-6 “Part1 细节”设置面板

2．定义斜齿轮-齿条装配接触关系

单击 Connections→Contacts→Bonden-Part1 To Part2，则出现如图 17-7 所示的“Part1 与 Part2 之间接触对细节”设置面板，将“Type”重新设置为“Frictionless”。

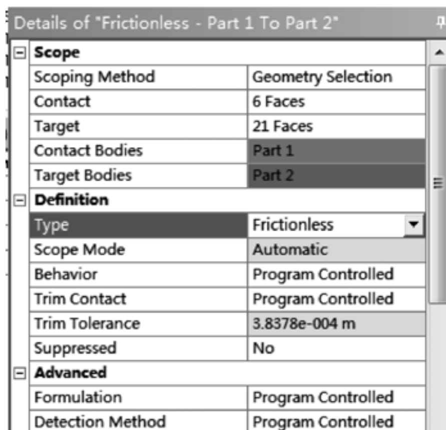


图 17-7 “Part1 与 Part2 之间接触对细节”设置面板

3．定义斜齿轮的铰接

右击“Connections”，选择 Insert→Joint，则在细节窗口出现如图 17-8 所示的“铰接细节”设置面板，设置铰接的联接方式为“Body-Ground”，类型为“Revolute”，选择斜齿轮的侧面单击“Apply”按钮。

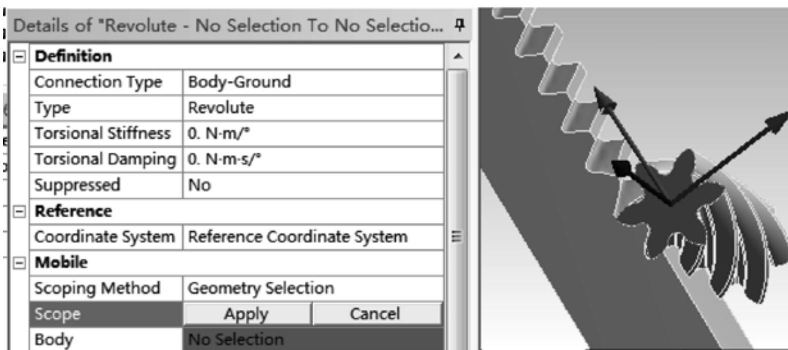


图 17-8 “铰接细节”设置面板

4．网格划分

单击“Mesh”按钮，弹出如图 17-9 所示的“网格划分细节”设置面板，设置“Relevance Center”为“Fine”，其他保持默认设置，然后右击“Mesh”按钮，选择“Generate Mesh”。

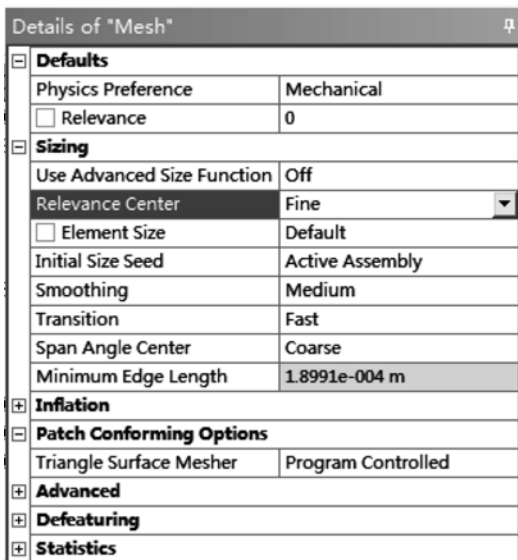


图 17-9 “网格划分细节”设置面板

17.3.5 模态求解

1．模态分析设置

单击 Modal→Analysis Settings，在细节显示窗口弹出如图 17-10 所示的“模态分析细节”设置面板，修改“Max Modes to Find”为“8”。

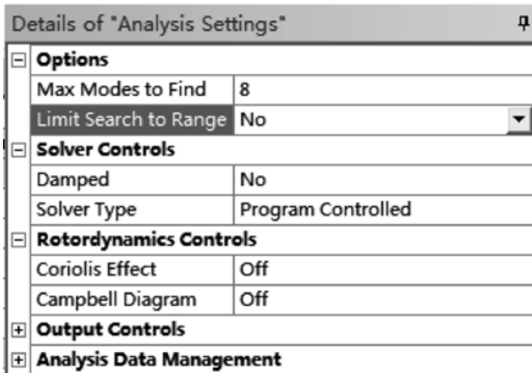


图 17-10 “模态分析细节”设置面板

2．定义位移

右击“Modal”，选择 Insert→Displacement，则出现如图 17-11 所示的“位移细节”设置面板，选择齿条的底面，单击“Apply”按钮，输入 3 个方向的位移约束都为“0”。.

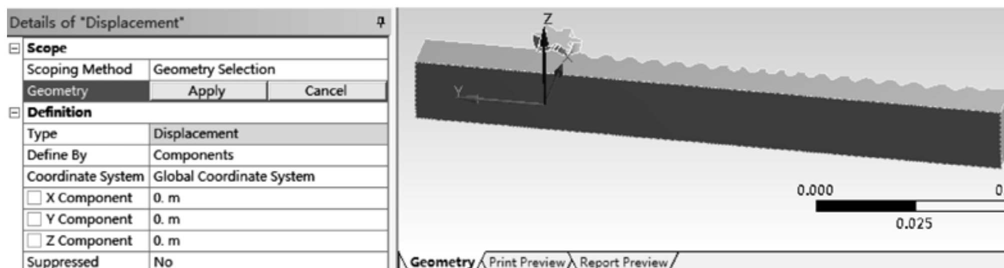


图 17-11 “位移细节”设置面板

3．求解

选择 Static Structural→Solution，右击“Solution”，选择“Solve”。

4．查看结果

图 17-12～图 17-14 分别给出了斜齿轮-齿条装配体的前 3 阶振型云图，图 17-15 给出了斜齿轮-齿条装配体计算的前 8 阶固有频率，具体查看方法读者可以参见本章的视频教程。

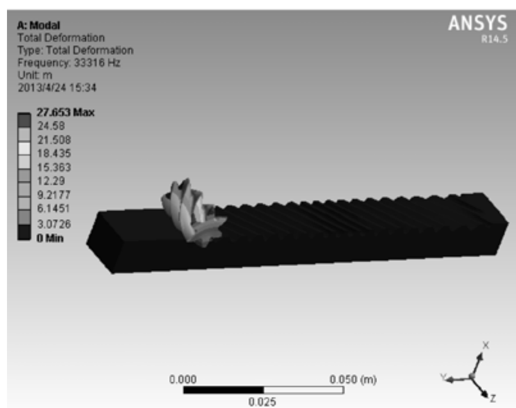


图 17-12 斜齿轮-齿条装配体的 1 阶模态云图

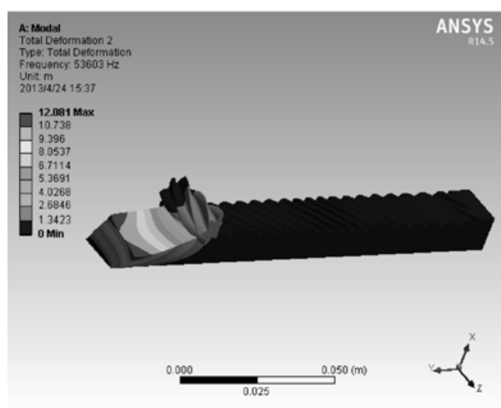


图 17-13 斜齿轮-齿条装配体的 2 阶模态云图

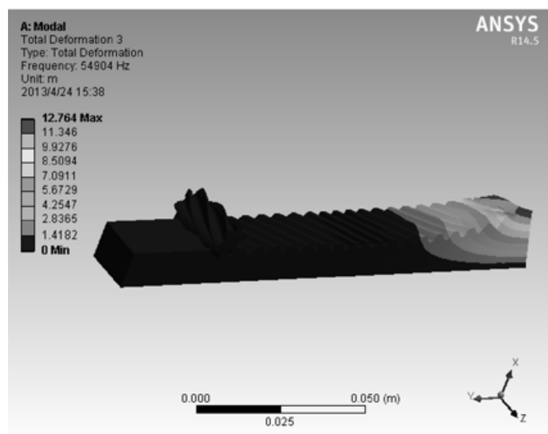


图 17-14 斜齿轮-齿条装配体的 3 阶模态云图

	Mode	Frequency [Hz]
1	1.	33316
2	2.	53603
3	3.	54904
4	4.	56108
5	5.	58264
6	6.	59757
7	7.	60292
8	8.	63695

图 17-15 斜齿轮-齿条装配体的固有频率列表

第 18 例　电机主轴的谐响应分析



18.1　实例覆盖的知识点

读者通过学习该实例可以掌握如下 Workbench 的知识点。

1）完全法谐响应分析的基本步骤。

2）模态叠加法谐响应分析的基本步骤。

3）联合 ANSYS 经典版与 Workbench 进行后处理的方法。

4）谐响应分析基本设置的方法。

5）定义谐响应激励的方法。

18.2　问题的描述

18.2.1 几何模型

图 18-1 给出了电机主轴的三维模型，该电机主轴为一个阶梯轴。

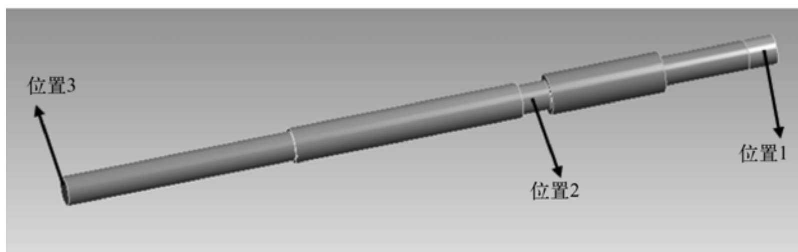


图 18-1　电机主轴的三维模型

18.2.2 材料参数

该电机主轴的材料为结构钢，弹性模量为 2.11E11Pa，泊松比为 0.31，密度为 7300，该电机主轴的结构阻尼比为 0.03。

18.2.3 边界条件和载荷

完全约束图 18-1 所示的位置 3 端面，在位置 2 施加一个 X 方向的正弦力，幅值为 300N，相位角为 0°，在位置 1 施加一个 Y 方向的正弦力，幅值为 500N，相位角为 90°。

18.3 完全法谐响应分析 GUI 操作

18.3.1 建立谐响应分析系统

启动 Workbench，双击 Workbench 工具箱中的“Harmonic Response”，弹出如图 18-2 所示的“谐响应分析系统”工程图。

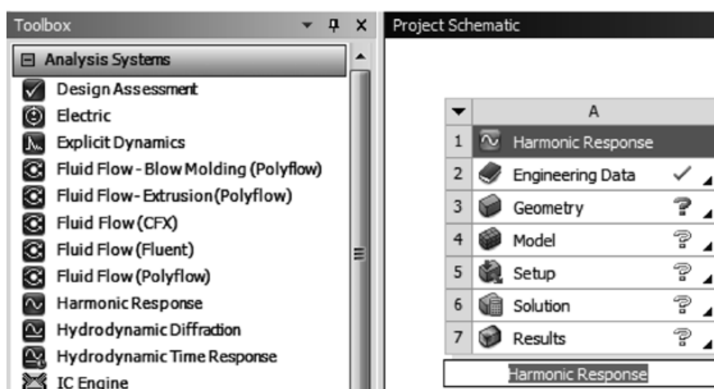


图 18-2 “谐响应分析系统”工程图

18.3.2 定义材料数据

单击谐响应分析系统中的“Engineering Data”子模块，选择“Structural Steel”上的结构钢选项，弹出如图 18-3 所示的“结构钢材料”数据列表，“Density”为“7300”，“Young's Modulus”设为“2.11E11”，“Poisson's Ratio”设为“0.31”，然后单击“Update Project”，最后单击“Return to Project”按钮。

Properties of Outline Row 3: Structural Steel

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Density	7300	kg m^-3		
3	Isotropic Elasticity				
4	Derive from	Young's M...			
5	Young's Modulus	2.11E+11	Pa		
6	Poisson's Ratio	0.31			
7	Bulk Modulus	1.8509E+11	Pa		
8	Shear Modulus	8.0534E+10	Pa		

图 18-3 “结构钢材料”数据列表

18.3.3 建立几何模型

如图 18-4 所示，右击静态结构分析系统中的几何体选项，选择 Import Geometry→

Browse，打开工作目录文件夹，选择电机主轴模型文件，单击“OK”按钮。

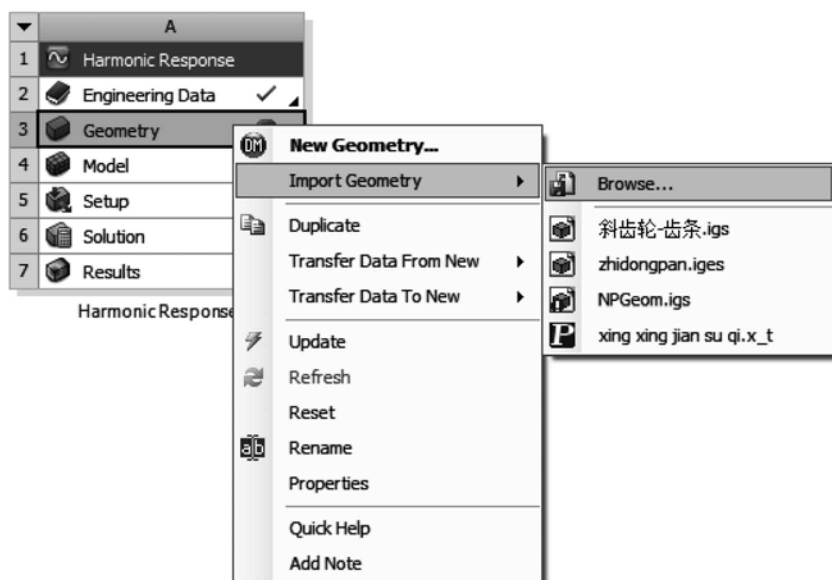


图 18-4　导入模型

18.3.4 创建有限元模型

选择谐响应分析系统中的“Modal”选项，进入谐响应系统，图 18-5 给出了“谐响应分析”流程图。

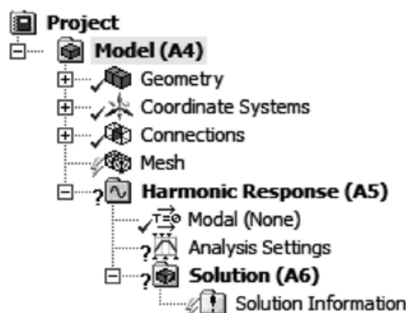


图 18-5　“谐响应分析”流程图

1．为电机主轴赋予材料

单击 Model→Geometry→Solid，则弹出如图 18-6 所示的“电机主轴细节”设置面板，用户一般只需设置该面板的两个子选项，即“Definition”和“Material”选项。在“Definition”选项中，用户可以设置模型的“Stiffness Behavior”“Coordinate System”和“Reference Temperature”，在“Material”选项中可以为模型指定“Assignment”，本实例选用材料为“Structural Steel”，按照图样操作设置其他 3 个 Solid 的材料。

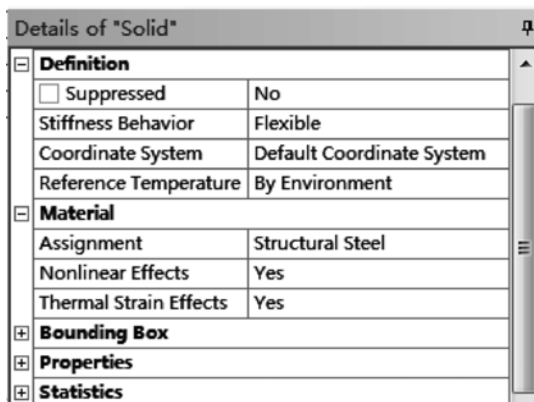


图 18-6 “电机主轴细节”设置面板

2．网格划分

单击“Mesh”按钮，弹出如图 18-7 所示的“网格划分细节”设置面板，设置“Relevance Center”为“Fine”，其他保持默认设置，然后右击“Mesh”按钮，选择“Generate Mesh”。

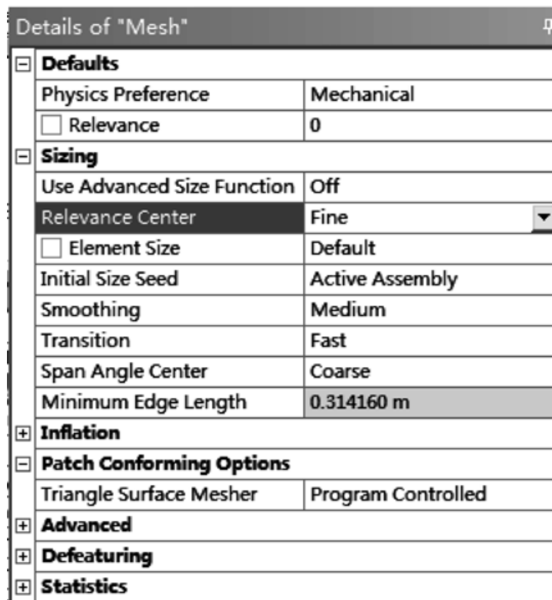


图 18-7 “网格划分细节”设置面板

18.3.5 谐响应分析

1．谐响应分析的基本设置

单击“Analysis Settings”，则在细节窗口出现如图 18-8 所示的“谐响应分析细节”设置窗口，输入激励的频率范围为 0～100Hz，求解间隔为“200”，即每隔 0.5Hz 求解一次，结构的“Constant Damping Ratio”为“0.03”，求解方法设置为“Full”，其他保持默认设置。

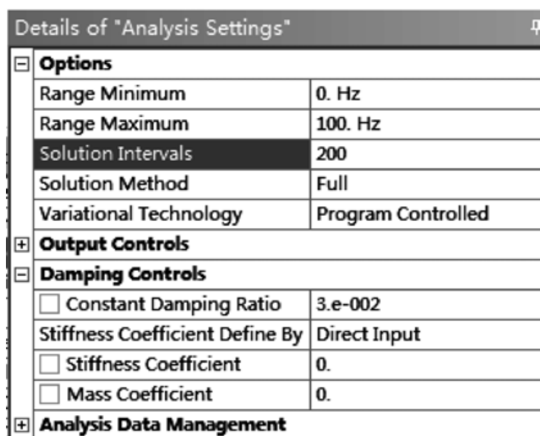


图 18-8 “谐响应分析细节”设置面板

2．定义固定约束

右击“Harmonic Response”，选择 Insert→Fixed Support，则在细节窗口出现如图 18-9 所示的“固定约束细节”设置面板，选择位置 3 的端面，单击“Apply”按钮。

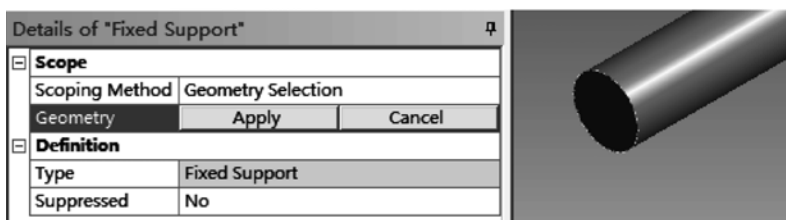


图 18-9 “固定约束细节”设置面板

3．定义位置 2 处的激励

右击“Steady-State Thermal”，按照图 18-10 的路径进行操作，选择 Insert→Force，在细节窗口出现如图 18-11 所示的“集中力细节”设置面板，选择位置 2 的表面，单击“Apply”按钮，设置定义力的方法为“Components”，输入 X 分量为“300”，“Phase Angle”为“0”。

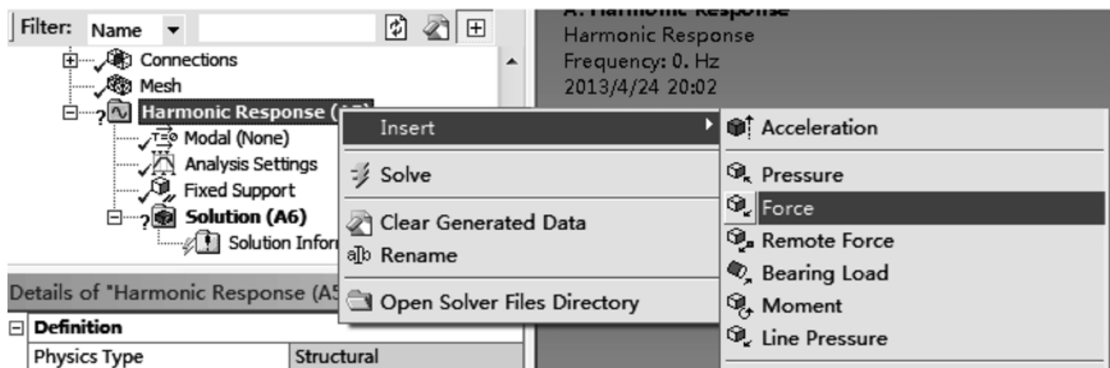


图 18-10 “定义集中力径”示意图

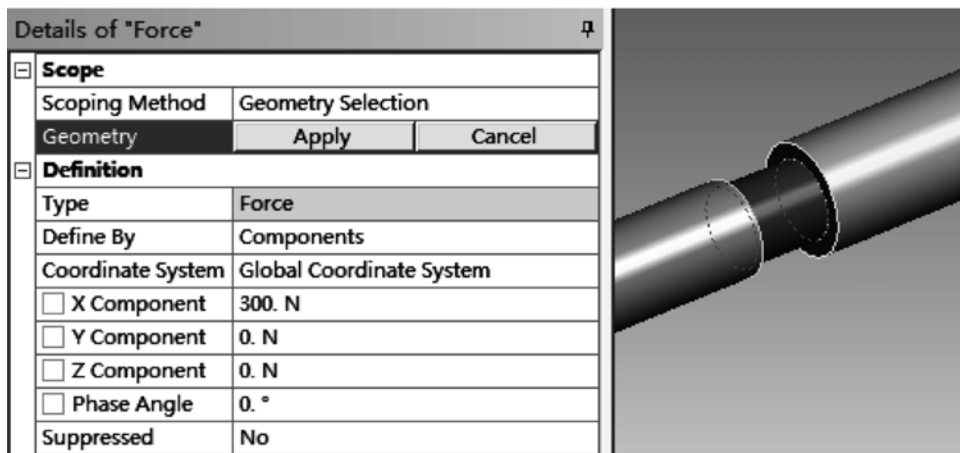


图 18-11 “集中力细节”设置面板 1

4．定义位置 3 处的激励

右击“Steady-State Thermal”，按照图 18-10 所示选择 Insert→Force，在细节窗口出现如图 18-12 所示的“集中力细节”设置面板，选择位置 3 的外表面，单击“Apply”按钮，设置定义力的方法为“Components”，输入 Y 分量为“500”，“Phase Angle”为“90”。

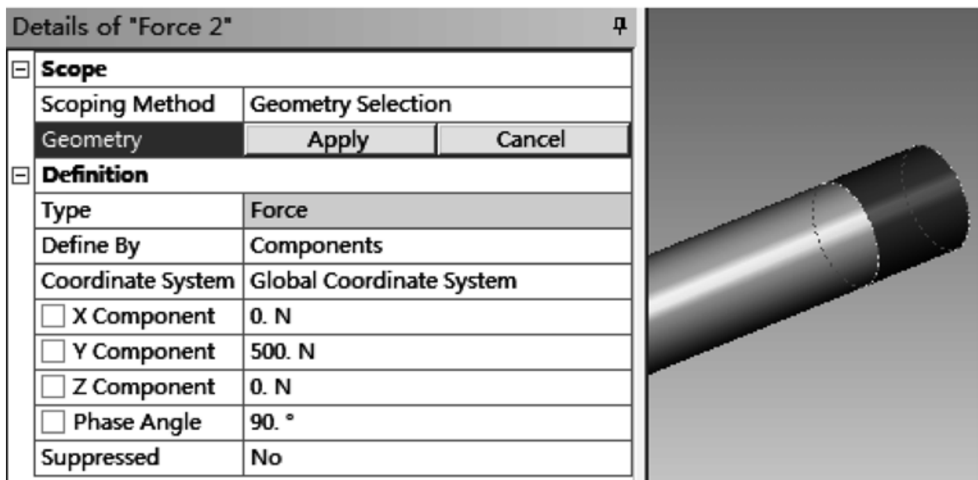


图 18-12 “集中力细节”设置面板 2

5．求解

选择 Harmonic Response→Solution，右击“Solution”，选择“Solve”。

6．观察结果

图 18-13～图 18-16 分别给出了电机主轴在不同激励频率作用下的变形云图，图 18-17 给出了位置 1 处 X 方向位移与激励频率的关系曲线，图 18-18 给出了位置 1 处 X 方向相位角与激励频率的关系曲线，图 18-19 给出了位置 1 处激励频率 100Hz 对应的 X 方向相位角响应曲线，具体查看方法读者可以参见本章的视频教程。

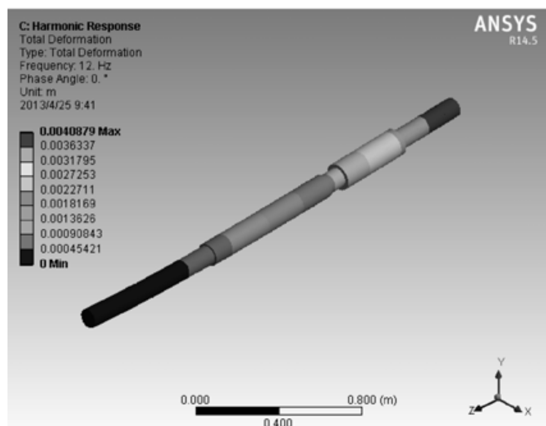


图 18-13 激励频率 12Hz 对应的变形云图

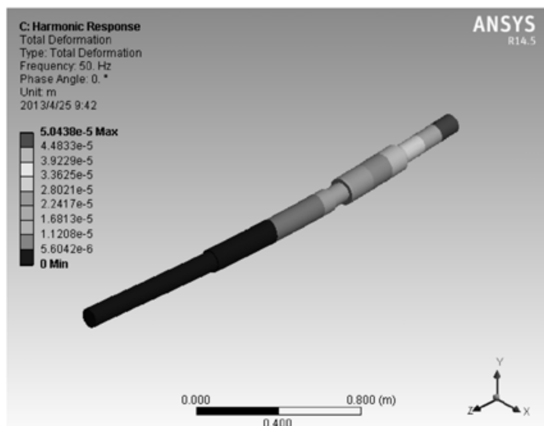


图 18-14 激励频率 50Hz 对应的变形云图

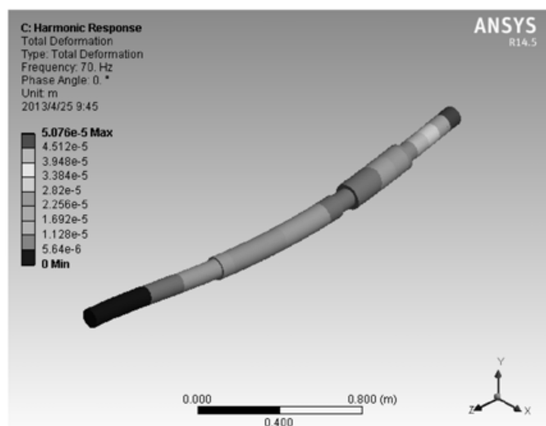


图 18-15 激励频率 70Hz 对应的变形云图

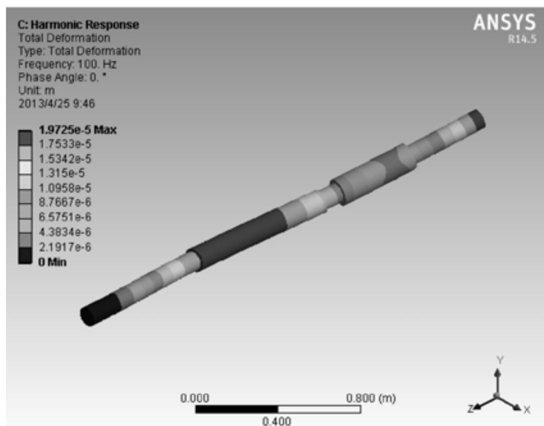


图 18-16 激励频率 100Hz 对应的变形云图

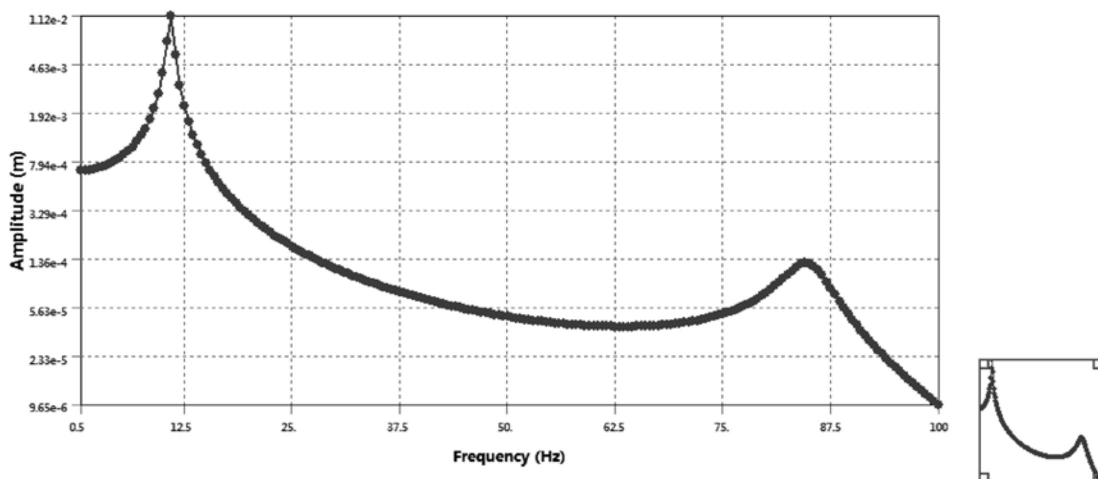


图 18-17 位置 1 处 X 方向位移与激励频率的关系曲线



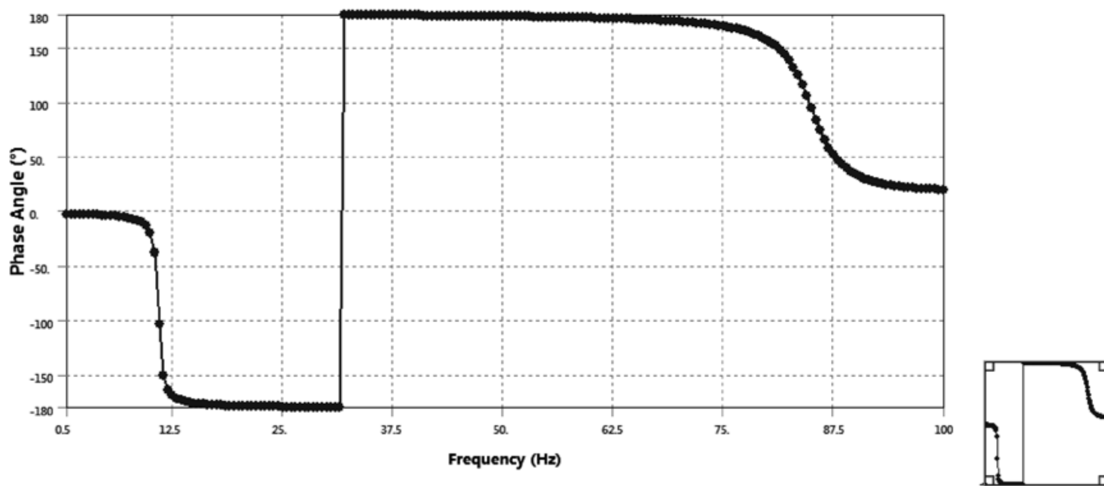


图 18-18　位置 1 处 X 方向相位角与激励频率的关系曲线

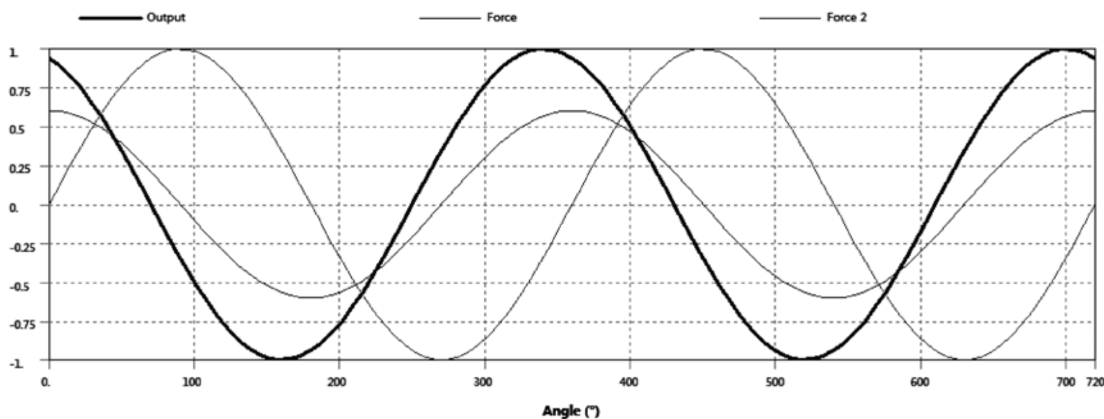


图 18-19　位置 1 处激励频率 100Hz 对应的 X 方向相位角响应曲线

18.4　模态叠加法谐响应分析 GUI 操作

18.4.1 建立模态叠加法谐响应分析系统

启动 Workbench，双击 Workbench 工具箱中的“Modal”，右击弹出的“Modal”分析系统的“Solution”，选择 Transfer Data To New→Harmonic Response，则会出现如图 18-20 所示的“模态叠加法谐响应分析”系统。

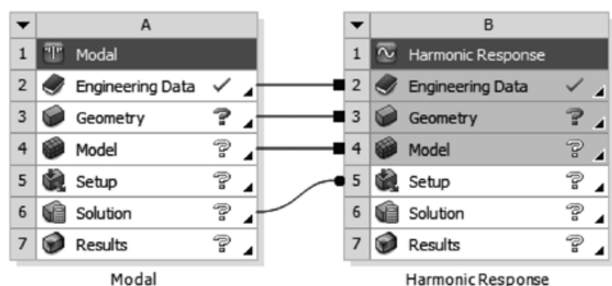


图 18-20 “模态叠加法谐响应分析”系统

18.4.2 定义材料数据

单击模态叠加法谐响应分析系统中的“Modal”的“Engineering Data”子模块，选择“Structural Steel”上的结构钢选项，弹出如图 18-3 所示的“结构钢材料”数据列表，重新密度为“7300”，杨氏模量设置为“2.11E11”，泊松比为“0.31”，然后选择“Update Project”选项，最后单击“Return to Project” 按钮。

18.4.3 建立几何模型

如图 18-4 所示，右击静态结构分析系统中的几何体选项，选择 Import Gemoetry→Browse，打开工作目录文件夹，选择电机主轴模型文件，单击“OK”按钮。

18.4.4 创建有限元模型

单击模态分析系统中的“Modal”选项，进入模态叠加法谐响应系统，图 18-21 给出了“模态叠加法谐响应分析”流程图，即首先进行模态分析，然后将模态分析获得固有频率和振型考虑到下一步的谐响应分析中。

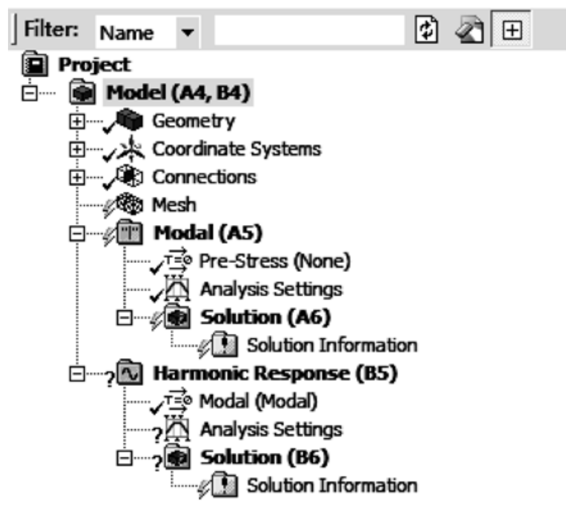


图 18-21 “模态叠加法谐响应分析”流程图

1．为电机主轴赋予材料

单击 Model→Geometry→Solid，则弹出如图 18-6 所示的“电机主轴细节”设置面板，用户一般只需设置该面板的两个子选项，即“Definition”和“Material”选项。在“Definition”选项中，用户可以设置模型的“Stiffness Behavior”“Coordinate System”和“Reference Temperature”，在“Material”选项中可以为模型指定“Assignment”，本实例选用材料为“Structural Steel”，按照图样操作设置其他 3 个“Solid”的材料。

2．网格划分

单击“Mesh”按钮，弹出如图 18-7 所示的“网格划分细节”设置面板，设置“Relevance Center”为“Fine”，其他保持默认设置，然后右击“Mesh”按钮，选择“Generate Mesh”。

18.4.5 模态分析

1．模态分析基本设置

单击“Modal”下方的“Analysis Settings”，则在细节窗口出现如图 18-22 所示的“模态分析细节”设置面板，设置“Max Modes to Find”为“60”，其他保持默认设置。

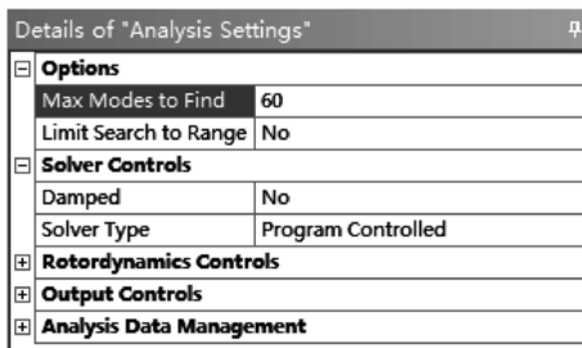


图 18-22 “模态分析细节”设置面板

2．定义固定约束

右击“Modal”，选择 Insert→Fixed Support，则在细节窗口出现如图 18-23 所示的“固定约束细节”设置面板，选择位置 3 的端面，单击“Apply”按钮。

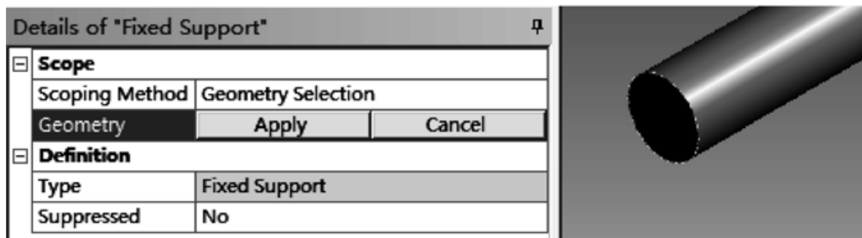


图 18-23 “固定约束细节”设置面板

3．设置查看结果选项

选择 Modal→Solution，右击“Solution”，选择 Insert→Deformation→Total，继续右击

“Solution”，选择 Insert→ Deformation→Total，再次右击“Solution”，选择 Insert→Deformation→Total，单击“Total Deformation”，在相应的细节窗口设置“Mode”为“1”，单击“Total Deformatio2”，在相应的细节窗口设置“Mode”为“2”，单击“Total Deformatio3”，在相应的细节窗口设置“Mode”为“3”，通过以上设置可以获得前三阶的模态振型。

4．求解

选择 Modal→Solution，右击“Solution”，选择“Solve”。

5．查看模态求解的结果

图 18-24～图 18-26 分别给出了电机主轴的前 3 阶振型云图，图 18-27 给出了电机主轴计算的前 10 阶固有频率。

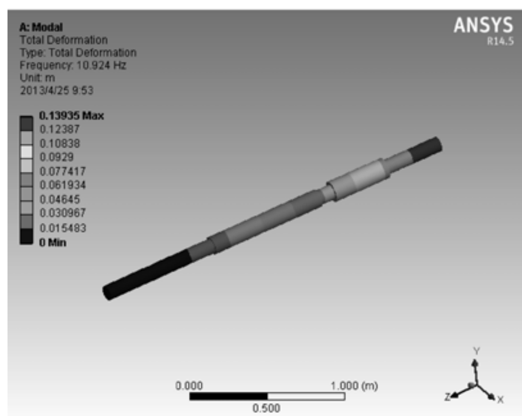


图 18-24　1 阶模态振型云图

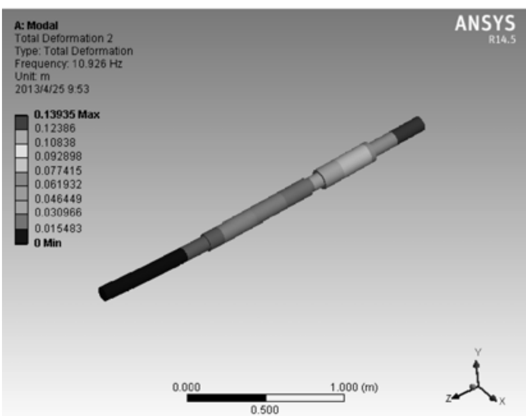


图 18-25　2 阶模态振型云图

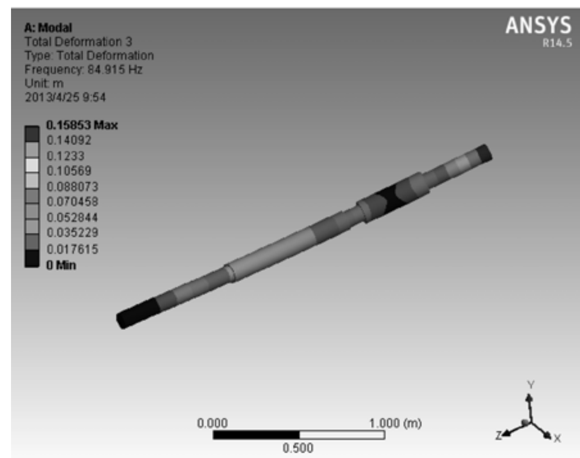


图 18-26　3 阶模态振型云图

	Mode	Frequency [Hz]
1	1.	10.924
2	2.	10.926
3	3.	84.915
4	4.	84.94
5	5.	233.76
6	6.	233.86
7	7.	257.56
8	8.	462.03
9	9.	462.22
10	10.	485.67

图 18-27　前 10 阶固有频率列表

18.4.6 谐响应分析

1．谐响应分析的基本设置

单击“Harmonic Response”下方的“Analysis Settings”，则在细节窗口出现如图 18-28

所示的“谐响应分析细节”设置面板，输入激励频率范围为 0～100Hz，求解次数为“200”，即每隔 0.5Hz 求解一次，“Constant Damping Ratio”为“0.03”，其他保持默认设置。

Details of "Analysis Settings"

Options	
Range Minimum	0. Hz
Range Maximum	100. Hz
Solution Intervals	200
Solution Method	Mode Superposition
Include Residual Vector	No
Cluster Results	No
Store Results At All Frequencies	Yes
Output Controls	
Damping Controls	
Constant Damping Ratio	3.e-002
Stiffness Coefficient Define By	Direct Input
Stiffness Coefficient	0.
Mass Coefficient	0.
Analysis Data Management	

图 18-28 “谐响应分析细节”设置面板

2．定义位置 2 处的激励

右击“Steady-State Thermal”，按照图 18-10 的路径进行操作，选择 Insert→Force，在细节窗口出现如图 18-11 所示的“集中力细节”设置面板，选择位置 2 的表面，单击“Apply”按钮，设置定义力的方法为“Components”，输入 X 分量为“300”，“Phase Angle”为“0”。

3．定义位置 3 处的激励

右击“Steady-State Thermal”，按照图 18-10 所示选择 Insert→Force，在细节窗口出现如图 18-12 所示的“集中力细节”设置面板，选择位置 3 的外表面，单击“Apply”按钮，设置定义力的方法为“Components”，输入 Y 分量为“500”，“Phase Angle”为“90”。

4．设置查看结果选项

选择 Harmonic Response→Solution，右击“Solution”，选择 Insert→Deformation→Total，查看变形，单击“Total Deformation”，在对应的细节设置窗口中输入“Frequency”为“12Hz”；继续右击“Solution”，选择 Insert→Deformation→Total，查看变形，单击“Total Deformation2”，在对应的细节设置窗口中输入“Frequency”为“50Hz”；继续右击“Solution”，选择 Insert→Deformation→Total，查看变形，单击“Total Deformation3”，在对应的细节设置窗口中输入“Frequency”为“100Hz”，其他查看选项读者可以参见本章的视频教程。

5．求解

选择 Harmonic Response→Solution，右击“Solution”，选择“Solve”。

6．观察结果

图 18-29～图 18-35 给出了与完全法计算同样情况的计算结果，由图可知，模态叠加法谐响应分析与完全法谐响应分析相比，计算速度快，精度略低于完全法，但能够满足工程需要。

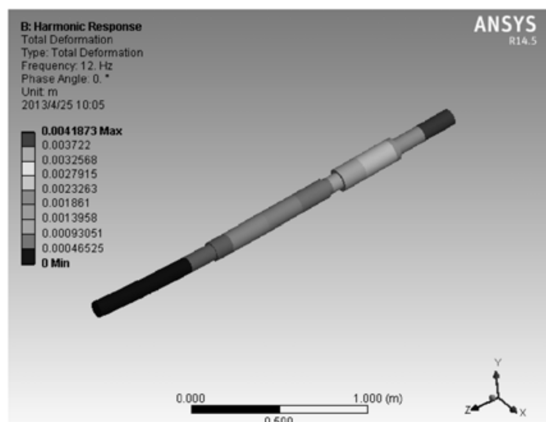


图 18-29　激励频率 12Hz 对应的变形云图

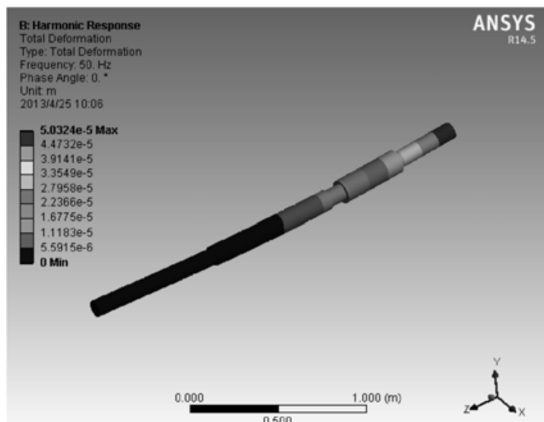


图 18-30　激励频率 50Hz 对应的变形云图

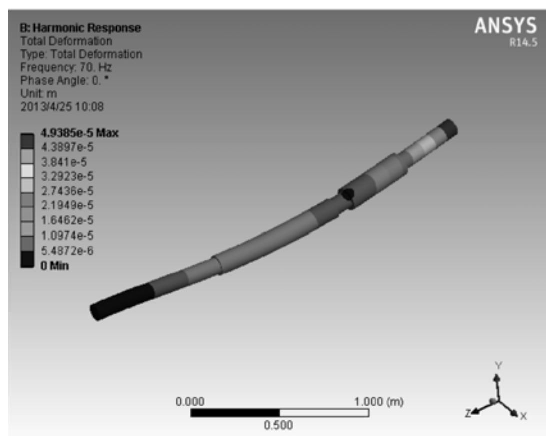


图 18-31　激励频率 70Hz 对应的变形云图

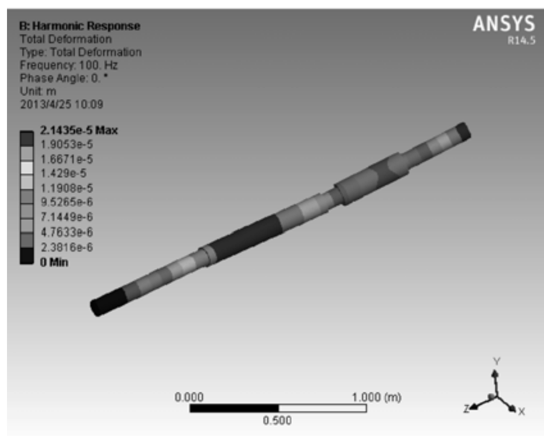


图 18-32　激励频率 100Hz 对应的变形云图

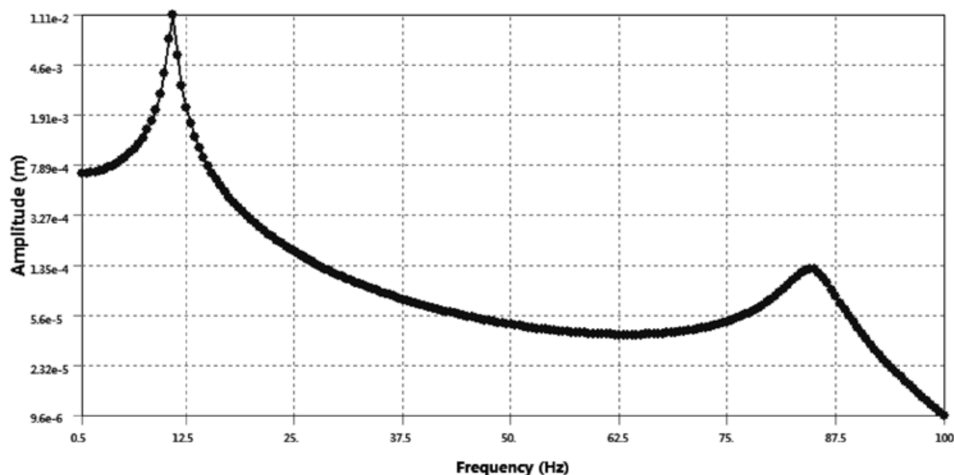


图 18-33　位置 1 处 X 方向位移与激励频率的关系曲线



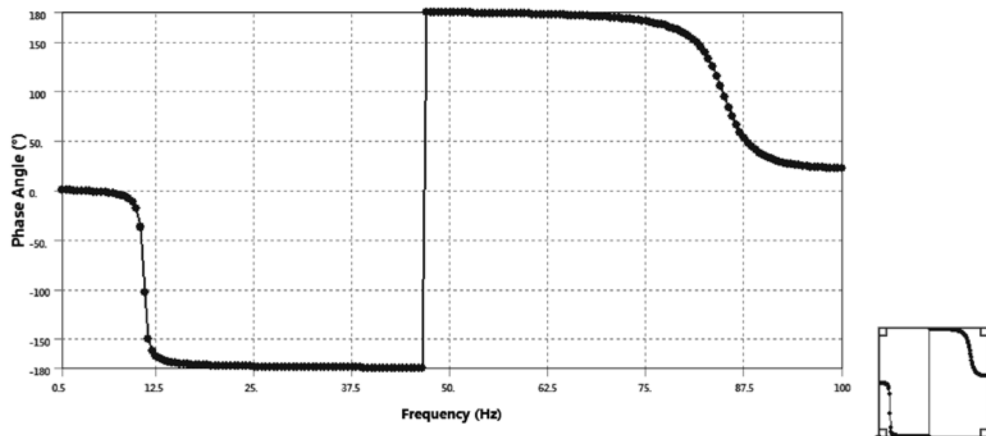


图 18-34 位置 1 处 X 方向相位角与激励频率的关系曲线

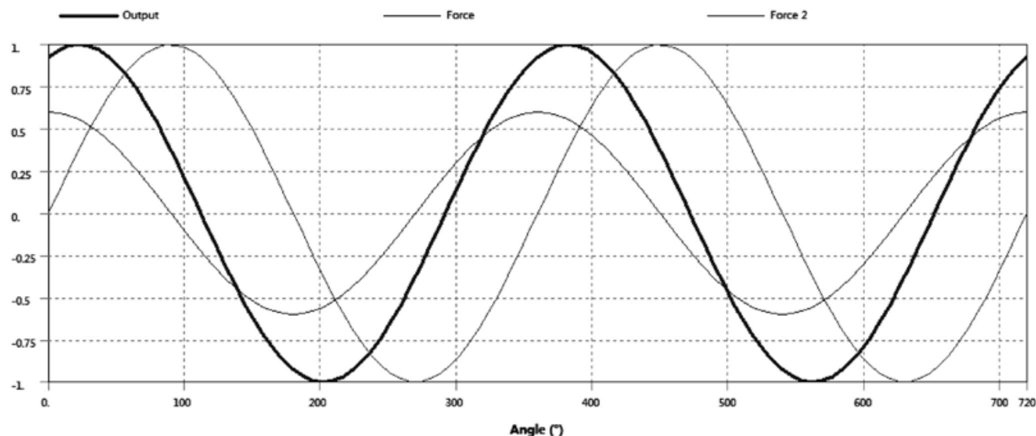


图 18-35 位置 1 处激励频率 100Hz 对应的 X 方向相位角响应曲线

18.5 联合 ANSYS 经典版与 WB 进行后处理

Workbench 的后处理功能只能对模型的点、线、面和体进行操作，而对节点位置的结果查看，只能将其计算结果转换到经典 ANSYS 环境中，图 18-36 给出了将 Workbench 计算结果导入经典 ANSYS 的示意图。

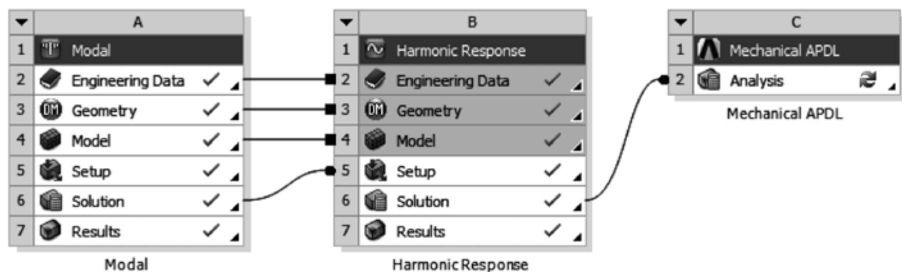


图 18-36 将 Workbench 计算结果导入经典 ANSYS 的示意图

右击“Mechanical APDL”下方“Analysis”，选择“Edit Mechanical APDL”，打开经典ANSYS环境。

1．POST1 通用后处理

使用下列方式读入计算结果文件。

GUI：Main Menu→General Postproc→Data& File Opts，弹出如图 18-37 所示的“数据和文件选项”设置面板，单击…打开文件，选取 file.rst 文件，单击“OK”按钮，接下来就可以进行通用后处理功能了，具体操作用户可以参见本章视频教程。

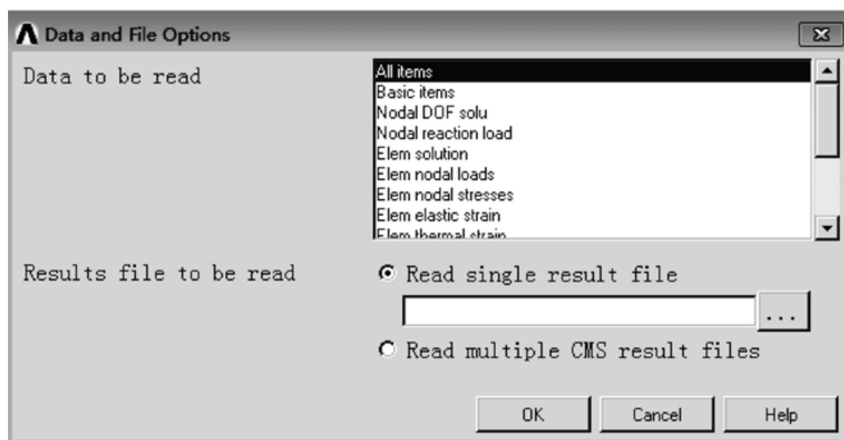


图 18-37 “数据和文件选项”设置面板

2．POST26 时间历程后处理

使用下列方式打开时间历程后处理器。

GUI：Main Menu→TimeHist Postpro，打开时间历程后处理器，图 18-38 和图 18-39 分别给出了 42 节点处 X 方向位移和相位角与激励频率的关系，具体查看方法用户可参见本章的视频教程。

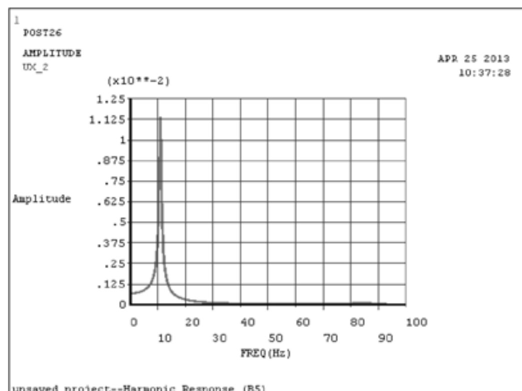


图 18-38 42 节点的 X 方向位移与激励频率的关系

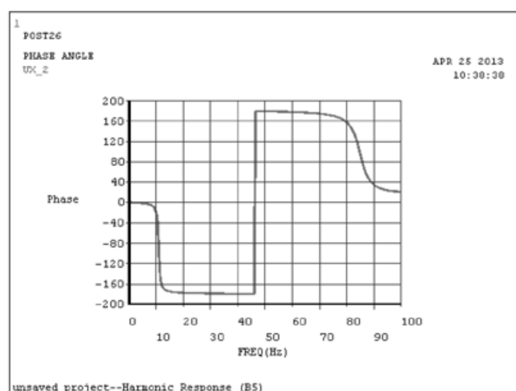


图 18-39 42 节点的相位角与激励频率的关系

第 19 例　管道表面椭圆裂纹的断裂力学计算

19.1　实例覆盖的知识点

读者通过学习该实例可以掌握如下 Workbench 的知识点。

1）使用 Workbench 进行静力学分析的基本步骤。

2）创建局部坐标系的方法。

3）创建椭圆裂纹的方法。

4）施加集中力的方法。

5）施加力矩的方法。

6）断裂力学后处理的基本方法。

19.2　问题的描述

19.2.1　几何模型

图 19-1 给出了管道的三维图，其中管道的长度为 1m，内半径为 0.1m，外半径为 0.108m，图 19-2 给出了管道裂纹横截面的示意图，本实例椭圆裂纹的计算参数取值如下，椭圆长半轴 b=0.05m，椭圆短半轴 a=0.006m，裂纹位于管道的中部。

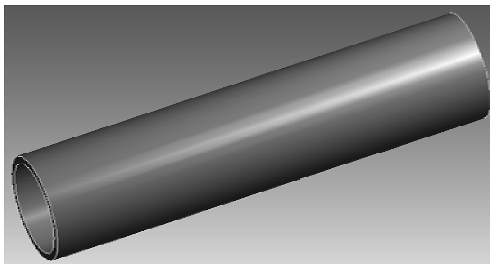


图 19-1　管道的三维图

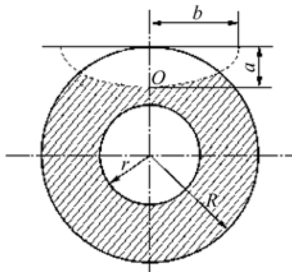


图 19-2　裂纹横截面示意图

19.2.2　材料参数

该管道的材料为结构钢，弹性模量为 2.1E11Pa，泊松比为 0.29。

19.2.3　边界条件和载荷

完全约束管道的一侧，在管道的另一侧施加垂直裂纹的集中力 F=1E4N，同时施加一个

扭矩 M=1000N·m。

19.3 GUI 操作

19.3.1 创建静力学分析系统

如图 19-3 所示，将 Workbench 工具箱中的结构静力学分析模块拖入到工程计划面板中。

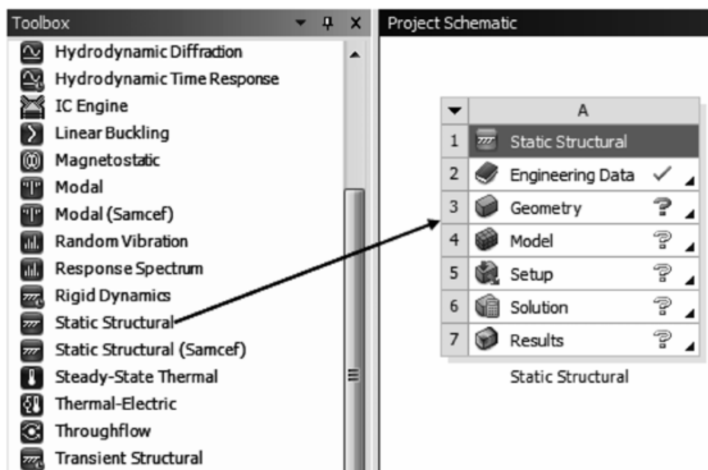


图 19-3 创建静力学分析系统示意图

19.3.2 定义材料数据

单击静态结构分析系统中的“Engineering Data”子模块，选择“Structural Steel”上的结构钢选项，弹出如图 19-4 所示的“结构钢材料”数据列表，将杨氏模量修改为“2.1E11”，泊松比为“0.29”，然后选择“Update Project”，最后单击“Return to Project”按钮。

Properties of Outline Row 3: Structural Steel

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Density	7850	kg m^-3		
3	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion				
6	Isotropic Elasticity				
7	Derive from	Young's ...			
8	Young's Modulus	2.1E+11	Pa		
9	Poisson's Ratio	0.29			
10	Bulk Modulus	1.6667E+11	Pa		
11	Shear Modulus	8.1395E+10	Pa		

图 19-4 “结构钢材料”数据列表

19.3.3 建立几何模型

如图 19-5 所示，右击静态结构分析系统中的几何体选项，选择 Import Gemoetry→Browse，打开工作目录文件夹，选择“pipe”模型文件，单击“OK”按钮。

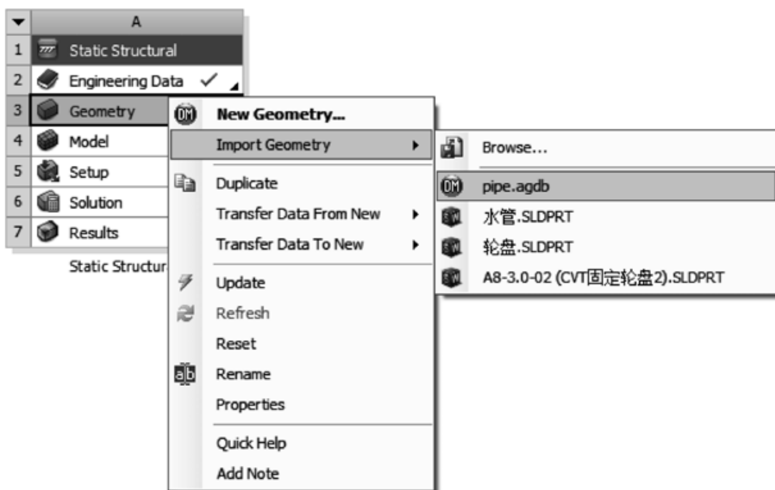


图 19-5　导入模型

19.3.4 创建有限元模型

选择静力学分析系统中的结构分析中的“Modal”选项，进入静力学分析系统。

1．为管道赋予材料

单击 Model→Geometry→Solid，则弹出如图 19-6 所示的“管道细节”设置面板，用户一般只需设置该面板的两个子选项，即“Definition”和“Material”选项。在“Definition”选项中，用户可以设置模型的“Stiffness Behavior”“Coordinate System”和“Reference Temperature”，在“Material”选项中可以为模型指定“Assignment”，本实例选用材料为“Structural Steel”。

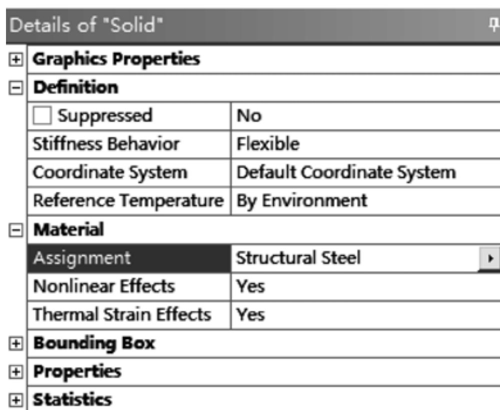


图 19-6　“管道细节”设置面板

2．建立局部坐标系

右击 Coordinate Sys→Insert→Coordinate System，弹出如图 19-7 所示的“局部坐标系细节”设置面板，设置定义方式为“Global Coordinates”，局部坐标系的原点坐标为 Origin X 为“0”，Origin Y 为“-0.108”，Origin Z 为“0.5”，“Principal Axis”和“Orientation About Principal Axis”根据图 19-7 进行设置。

Details of "Coordinate System"

Definition	
Type	Cartesian
Coordinate System	Program Controlled
Origin	
Define By	Global Coordinates
Origin X	0. m
Origin Y	-0.108 m
Origin Z	0.5 m
Location	Click to Change
Principal Axis	
Axis	X
Define By	Global Y Axis
Orientation About Principal Axis	
Axis	Y
Define By	Global Z Axis

图 19-7 “局部坐标系细节”设置面板

3．网格划分

单击“Mesh”按钮，可以在细节窗口看到如图 19-8 所示的“划分网格细节”设置面板，设置“Relevance Center”为“Fine”，单元尺寸为“8E-3”，其他保持默认设置。右击“Mehs”，选择 Insert→Method，弹出如图 19-9 所示的“网格划分方法细节”设置面板，选择“Geometry”为管道，“Method”为“Tetrahedrions”，其他保持默认设置。

Details of "Mesh"

Defaults	
Physics Preference	Mechanical
Relevance	0
Sizing	
Use Advanced Size Function	Off
Relevance Center	Fine
Element Size	8.e-003 m
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	Medium
Transition	Fast
Span Angle Center	Coarse
Minimum Edge Length	0.628320 m
Inflation	
Patch Conforming Options	
Triangle Surface Mesher	Program Controlled
Advanced	
Defeaturing	
Statistics	

图 19-8 “划分网格细节”设置面板

Details of "Patch Conforming Method" - Method

Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Body
Definition	
Suppressed	No
Method	Tetrahedrons
Algorithm	Patch Conforming
Element Midside Nodes	Use Global Setting

图 19-9 “网格划分方法细节”设置面板

4．创建裂纹

右击“Model”，选择 Insert→Fracture，在 Project 列表中出现了“Fracture”，右击“Fracture”，选择 Insert→Crack，单击“Crack”按钮，出现如图 19-10 所示的“裂纹细节”设置面板，设置“Geometry”为管道，“Coordinate System”为“Coordinate System”，“Major Radius”为“0.05”，“Minor Radius”为“0.006”，“Largest Contour Radius”为“0.01”，“Circumferential Divisions”为“24”，“Mesh Contours”为“8”，“Crack Front Divisions”为“30”，然后右击“Crack”，选择“Generate All Crack Meshes”，生成如图 19-11 所示的裂纹尖端网格。

Details of "Crack"

Scope	
Source	Crack
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Body
Definition	
Coordinate System	Coordinate System
Crack Shape	Semi-Elliptical
--Major Radius	5.e-002 m
--Minor Radius	6.e-003 m
Fracture Affected Zone	Program Controlled
Fracture Affected Zone Height	2.5212e-002 m
Largest Contour Radius	1.e-002 m
Circumferential Divisions	24
Mesh Contours	8
Crack Front Divisions	30
Solution Contours	Match Mesh Contours
Suppressed	No

图 19-10 “裂纹细节”设置面板

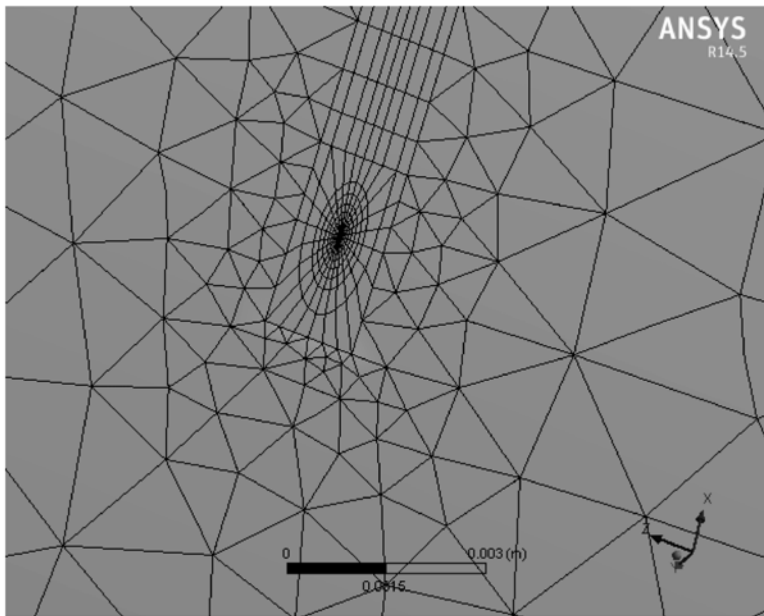


图 19-11 裂纹尖端网格

19.3.5 静力学求解

1．静力学求解设置

单击“Static Structural”下方的“Analysis Settings”，则会出现如图 19-12 所示的“静力学求解分析细节”设置面板，设置“Large Deflection”为“On”，表明激活了大变形。

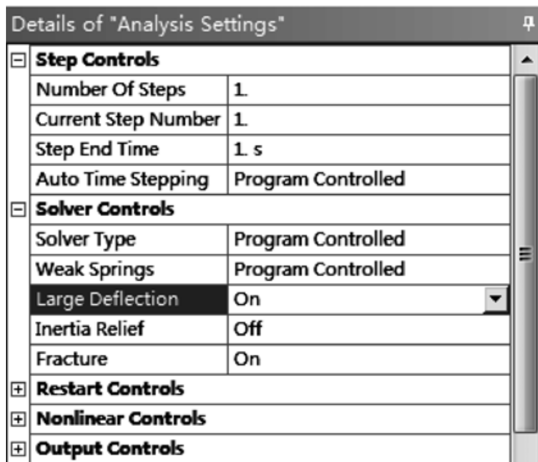


图 19-12 “静力学求解分析细节”设置面板

2．添加固定约束

右击“Static Structural”，选择 Insert→Fixed Support，则会出现如图 19-13 所示的“固定约束细节”设置面板，选择管道的一个端面，单击“Apply”按钮。

Details of "Fixed Support 2"	
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	Apply / Cancel
Definition	
Type	Fixed Support
Suppressed	No

图 19-13 “固定约束细节”设置面板

3．添加力

右击“Static Structural”，选择 Insert→Fixed Support，则会出现如图 19-14 所示的“力细节”设置面板，选择管道的另一个端面，单击“Apply”按钮，设置定义力的方法为“Components”，设置“Coordinate System”为“Global Coordinate System”，输入 Y Component 为“10000”。

Details of "Force 2"	
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	Apply / Cancel
Definition	
Type	Force
Define By	Components
Coordinate System	Global Coordinate System
X Component	0. N (ramped)
Y Component	10000 N (ramped)
Z Component	0. N (ramped)
Suppressed	No

图 19-14 “力细节”设置面板

4．添加力矩

右击“Static Structural”，选择 Insert→Fixed Support，则会出现如图 19-15 所示的“力矩细节”设置面板，选择已经施加力的端面，单击“Apply”按钮，设置定义力矩的方法为“Components”，设置“Coordinate System”为“Global Coordinate System”，输入 Z Component 为“1000”。

Details of "Moment"	
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Face
Definition	
Type	Moment
Define By	Components
Coordinate System	Global Coordinate System
X Component	0. N·m (ramped)
Y Component	0. N·m (ramped)
Z Component	1000. N·m (ramped)
Suppressed	No
Behavior	Deformable
Advanced	

图 19-15 “力矩细节”设置面板

5．设置查看结果选项

选择 Static Structural→Solution，右击“Solution”，选择 Insert→Stress→Equivalent（von-Mises），查看等效应力；右击“Solution”，选择 Insert→Deformation→Total；右击“Solution”，选择 Insert→Fracture Tool，单击“Fracture Tool”，从“Crack Selection”下拉列表选择“Crack”，右击“Fracture Tool”，选择 Insert→J-Integral(JINT)，右击“Fracture Tool”，选择 Insert→SIFS Results→ SIFS(K1)，右击“Fracture Tool”，选择 Insert→SIFS Results→SIFS(K2)，右击“Fracture Tool”，选择 Insert→SIFS Results→SIFS(K,3)。

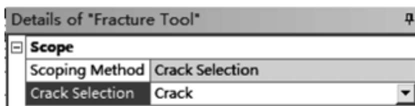


图 19-16 “断裂工具细节”设置面板

6．求解

选择 Static Structural→Solution，右击“Solution”，选择“Solve”。

7．观察结果

图 19-17～图 19-22 分别给出了管道的位移，裂纹尖端等效应力以及裂纹的 3 种类型应力强度因子和 J 积分的数值云图；图 19-23 和图 19-24 分别给出了管道裂纹的 KI 以及 J 积分与裂纹前缘位置的关系。

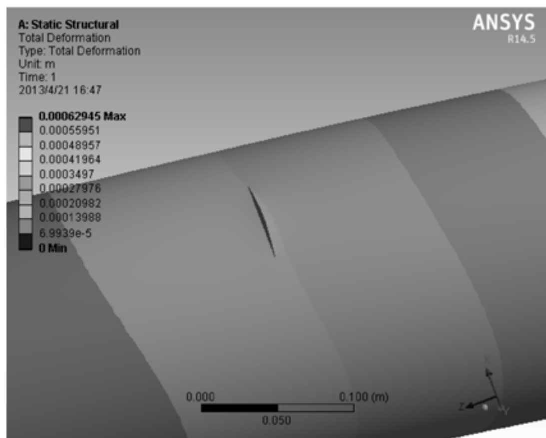


图 19-17 管道的总体变形云图

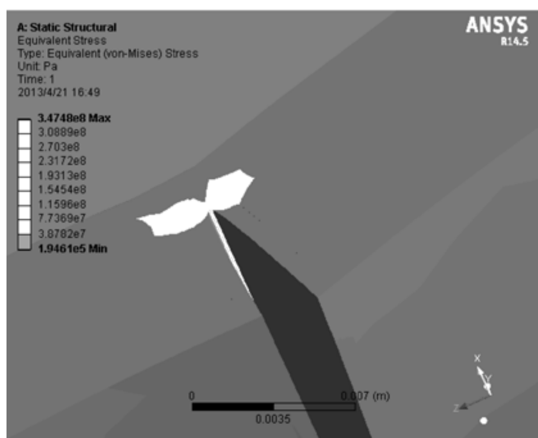


图 19-18 管道裂纹尖端等效应力云图

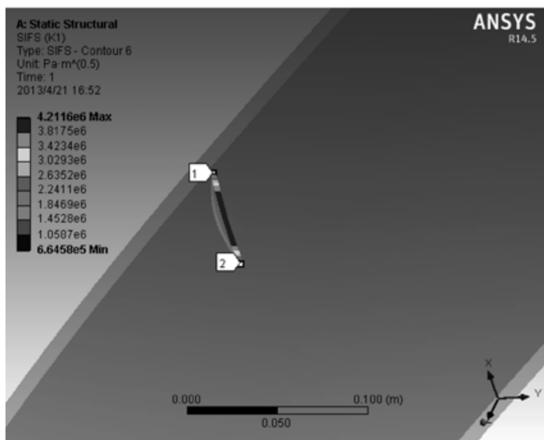


图 19-19 管道裂纹 KI 数值云图

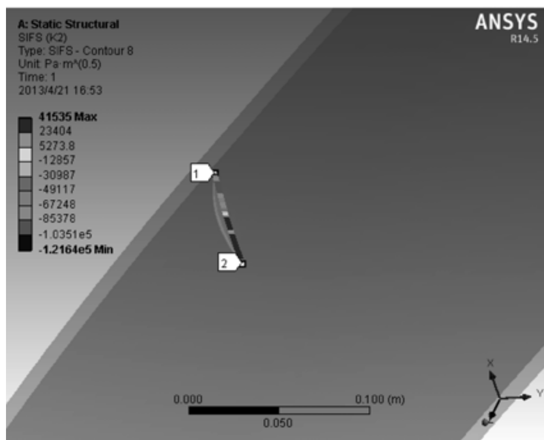


图 19-20 管道裂纹 KII 数值云图



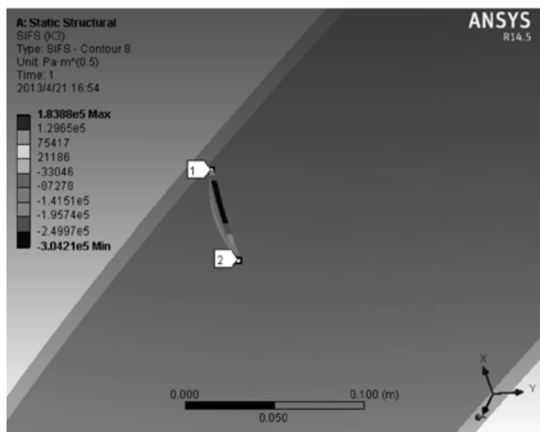


图 19-21　管道裂纹 KIII 数值云图

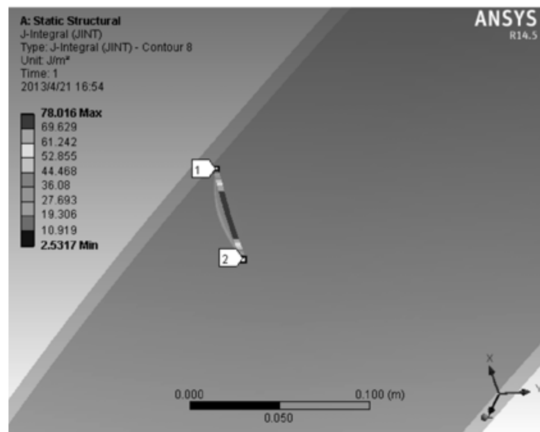


图 19-22　管道裂纹 J 积分数值云图

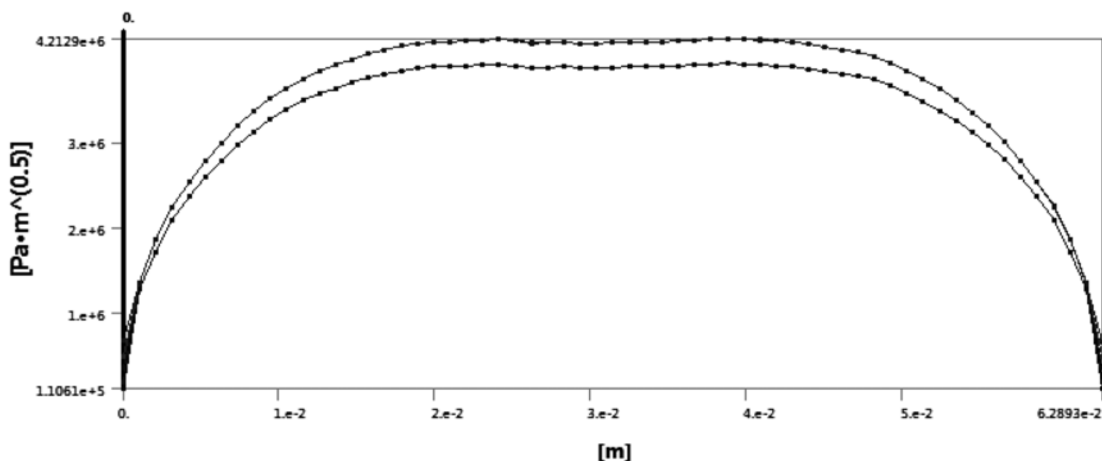


图 19-23　管道裂纹 KI 与裂纹前缘位置关系

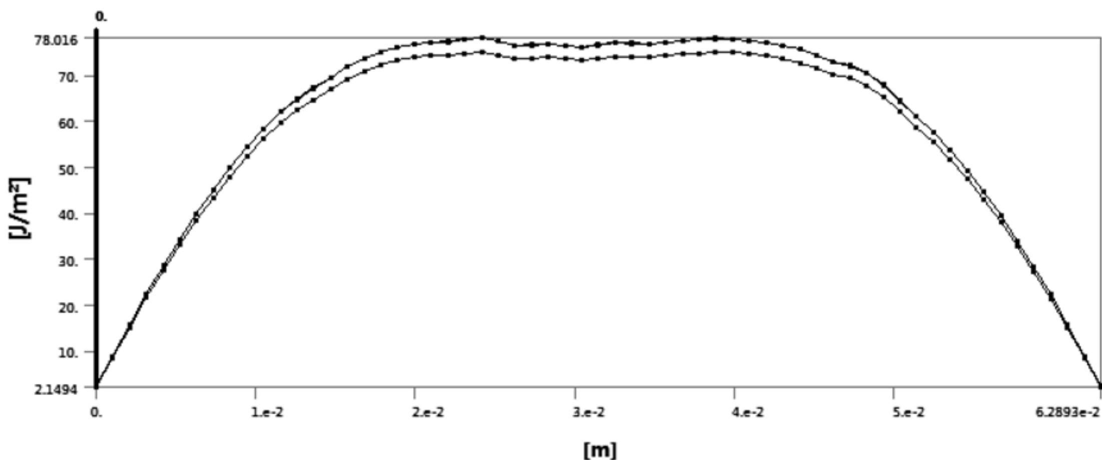


图 19-24　管道裂纹 J 积分与裂纹前缘位置关系

第 20 例　斜齿轮动态接触瞬态动力学分析



20.1　实例覆盖的知识点

读者通过学习该实例可以掌握如下 Workbench 的知识点。

1）使用 Workbench 进行瞬态动力学分析的步骤。

2）创建接触对的方法。

3）创建运动副的方法。

4）实现齿轮动态接触分析的基本步骤。

5）施加力矩的方法。

6）施加齿轮转速的方法。

20.2　问题的描述

20.2.1 几何模型

图 20-1 给出了斜齿轮装配体的模型，在这里约定上方齿轮为齿轮 1，下方齿轮为齿轮 2，齿轮 1 为主动齿轮，齿轮 2 为从动齿轮。



图 20-1　斜齿轮装配体模型

20.2.2 材料参数

本实例假设齿轮 1 和齿轮 2 都为线弹性材料，齿轮 1 的弹性模量为 1.9E11Pa，泊松比为 0.31，密度为 7800kg/m^3；齿轮 2 的弹性模量为 2.1E11Pa，泊松比为 0.29，密度为 7500kg/m^3。

20.2.3 边界条件和载荷

约束齿轮 2 的平动位移，在齿轮 1 上施加一个 25rad/s 的转速，两个齿轮之间为摩擦接触，摩擦系数为 0.1，在从动齿轮上施加一个阻力矩 80N·m，计算时间为 0.15s。

20.3 GUI 操作

20.3.1 创建瞬态动力学分析系统

启动 Workbench，双击 Workbench 工具箱中的“Transient Structural”，弹出如图 20-2 所示的“瞬态动力学分析”系统工程图。

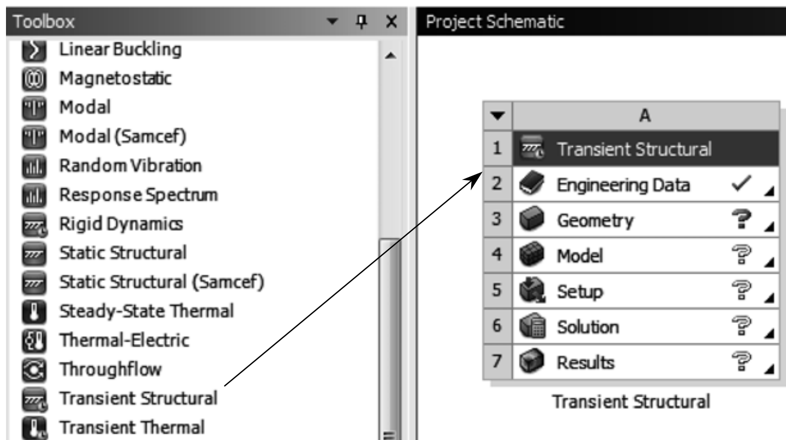


图 20-2 “瞬态动力学分析”系统工程图

20.3.2 定义材料数据

单击瞬态动力学分析系统中的“Engineering Data”子模块，选择“Outline of Schematic A2:Engineering Data”上的“Structural Steel”选项，将其名字设置为“Gear1”，单击“Gear1”下方的“Click here to add a new material”，输入“Gear2”；重新单击“Gear1”，弹出如图 20-3 所示的“Gear1 材料”数据列表，重新密度为“7800”，杨氏模量设置为“1.9E11”，泊松比为“0.31”；单击“Gear2”，然后从“Toolbox”中双击 Physical Properties→Density，继续双击 Linear Elastic→Isotropic Elasticity，通过以上操作，则出现如图 20-4 所示的“Gear2 材料”数据列表，然后单击“Update Project”，最后单击“Return to Project”按钮。

Properties of Outline Row 3: Gear1

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Density	7800	kg m^-3		
3	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion				
4	Coefficient of Thermal Expansion	1.2E-05	C^-1		
5	Reference Temperature	22	C		
6	Isotropic Elasticity				
7	Derive from	Young's M...			
8	Young's Modulus	1.9E+11	Pa		
9	Poisson's Ratio	0.31			
10	Bulk Modulus	1.6667E+11	Pa		
11	Shear Modulus	7.2519E+10	Pa		
12	Alternating Stress Mean Stress	Tabular			
16	Strain-Life Parameters				

图 20-3 “Gear1 材料”数据列表

Properties of Outline Row 4: Gear2

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Density	7500	kg m^-3		
3	Isotropic Elasticity				
4	Derive from	Young's M...			
5	Young's Modulus	2.1E+11	Pa		
6	Poisson's Ratio	0.29			
7	Bulk Modulus	1.6667E+11	Pa		
8	Shear Modulus	8.1395E+10	Pa		

图 20-4 “Gear2 材料”数据列表

20.3.3 建立几何模型

如图 20-5 所示，右击瞬态动力学分析系统中的几何体选项，选择 Import Gemoetry→Browse，打开工作目录文件夹，选择斜齿轮装配体模型文件，单击“OK”按钮。



图 20-5 导入模型

20.3.4 创建有限元模型

选择瞬态动力学分析系统中的“Modal”选项，进入瞬态动力学分析系统，图 20-6 给出了“瞬态动力学分析”流程图。

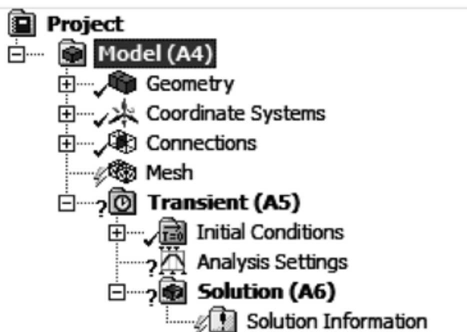


图 20-6 “瞬态动力学分析”流程图

1．为模型赋予材料

单击 Model→Geometry→Gear-1，则弹出如图 20-7 所示的“齿轮 1 细节”设置面板，用户一般只需设置该面板的两个子选项，即“Definition”和“Material”选项。在“Definition”选项中，用户可以设置模型的“Stiffness Behavior”“Coordinate System”和“Reference Temperature”，在“Material”选项中可以为模型指定“Assignment”，本实例选用材料为“Gear1”，然后继续选择 Model→Geometry→Part3-1，则在细节窗口出现如图 20-8 所示的“齿轮 2 细节”设置面板，右击“Assignment”，选择“Gear2”。

Details of "Gear-1"

Graphics Properties	
Definition	
Suppressed	No
Stiffness Behavior	Flexible
Coordinate System	Default Coordinate System
Reference Temperature	By Environment
Material	
Assignment	gear1
Nonlinear Effects	Yes
Thermal Strain Effects	Yes
Bounding Box	
Properties	
Statistics	

图 20-7 “齿轮 1 细节”设置面板

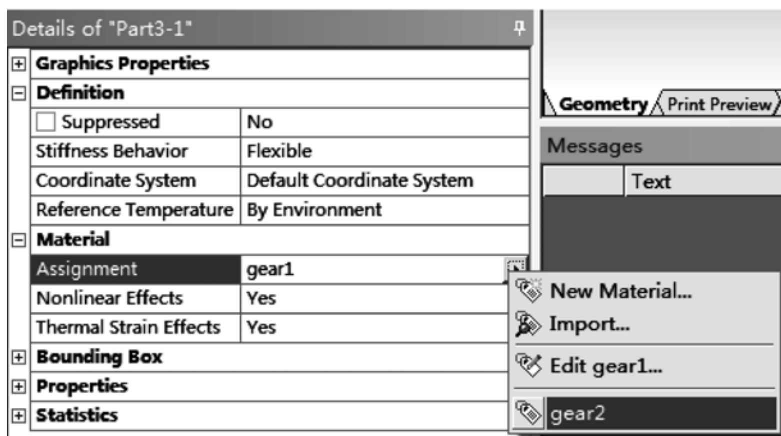


图 20-8 “齿轮 2 细节”设置面板

2．网格划分

单击“Mesh”按钮，弹出如图 20-9 所示的“网格划分细节”设置面板，设置 Relevance Center 为“Fine”，其他保持默认设置，然后右击“Mesh”按钮，选择“Generate Mesh”。

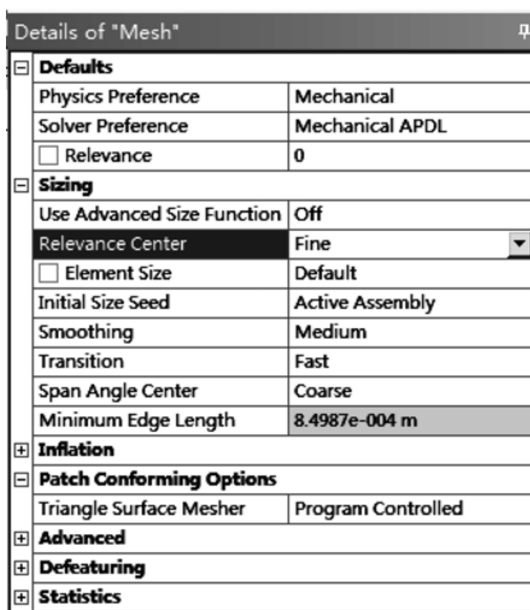


图 20-9 “网格划分细节”设置面板

3．选取两个齿轮的外轮廓面

该步的操作读者可参见本章的视频操作，其中齿轮 1 的外轮廓面命名为 C1，齿轮 2 的外轮廓面命名为 C2。该步的操作主要是为建立两个齿轮之间的接触对时便于选择接触面和目标面。

4．定义斜齿轮之间的接触对

单击 Connections→Contacts→Contact Region，则在细节窗口出现如图 20-10 所示的“接

触对细节”设置面板，设置选择方法为“Named Selection”，“Contact”为“C2”，“Target”为“C1”，接触类型为“Frictional”，输入摩擦系数为“0.1”，其他设置保持默认。

Details of "Frictional - c2 To c1"

Scope	
Scoping Method	Named Selection
Contact	c2
Target	c1
Contact Bodies	Part3-1
Target Bodies	Gear-1
Definition	
Type	Frictional
Friction Coefficient	0.1
Scope Mode	Manual
Behavior	Program Controlled
Trim Contact	Program Controlled
Suppressed	No
Advanced	
Formulation	Program Controlled
Detection Method	Program Controlled
Penetration Tolerance	Program Controlled
Elastic Slip Tolerance	Program Controlled
Interface Treatment	Add Offset, No Rampi...

图 20-10 “接触对细节”设置面板

5．定义斜齿轮转动副

（1）定义齿轮 1 的转动副

右击“Connections”，选择 Insert→Joint，则在细节窗口出现如图 20-11 所示的“铰接细节”设置面板，设置“Connection Type”为“Body-Ground”，铰接类型为“Revolute”，选择齿轮 1 的内孔面，单击“Apply”按钮。

Details of "Revolute - Ground To No Selection"

Definition		
Connection Type	Body-Ground	
Type	Revolute	
Torsional Stiffness	0. N·m/°	
Torsional Damping	0. N·m·s/°	
Suppressed	No	
Reference		
Coordinate System	Reference Coordinate System	
Mobile		
Scoping Method	Geometry Selection	
Scope	Apply	Cancel
Body	No Selection	
Initial Position	Unchanged	
Behavior	Rigid	
Pinball Region	All	
Stops		

图 20-11 “铰接细节”设置面板

（2）定义齿轮 2 的转动副

右击“Connections”，选择 Insert→Joint，则在细节窗口出现如图 20-11 所示的“铰接细节”设置面板，设置“Connection Type”为“Body-Ground”，铰接类型为“Revolute”，选择齿轮 2 的内孔面，单击“Apply”按钮。

20.3.5 瞬态动力学求解

1．瞬态动力学求解的基本设置

单击“Transient”下方的“Analysis Settings”，则在细节窗口出现如图 20-12 所示的“瞬态动力学求解细节”设置面板，设置计算结束时间为“0.15”，初始时间步为“0.0025”，最小时间步为“0.0025”，最大时间步为“0.01”，其他设置保持默认。

Details of "Analysis Settings"

Step Controls	
Number Of Steps	1.
Current Step Number	1.
Step End Time	0.15 s
Auto Time Stepping	On
Define By	Time
Initial Time Step	2.5e-003 s
Minimum Time Step	2.5e-003 s
Maximum Time Step	1.e-002 s
Time Integration	On
Solver Controls	
Solver Type	Program Controlled
Weak Springs	Program Controlled
Large Deflection	On
Restart Controls	
Nonlinear Controls	
Output Controls	
Damping Controls	
Analysis Data Management	

图 20-12 “瞬态动力学求解细节”设置面板

2．定义转速

右击“Transient”，选择 Insert→Joint Load，则在细节窗口出现如图 20-13 所示的“转动副细节”设置面板，选择“Joint”为“Revolute-Ground To Gear-1”，设置“Type”为“Rotational Velocity”，“Magnitude”为“Tabular Data”，为了确保计算收敛，在一个计算时间步内线性增加转速到 25rad/s，如图 20-14 所示。

Details of "Joint - Rotational Velocity"

Scope	
Joint	Revolute - Ground To Gear-1
Definition	
DOF	Rotation Z
Type	Rotational Velocity
Magnitude	Tabular Data
Lock at Load Step	Never
Suppressed	No

图 20-13 “转动副细节”设置面板



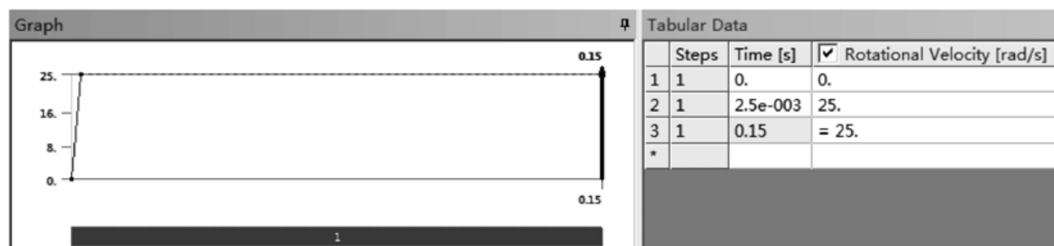


图 20-14　转速与时间的关系

3．定义阻力矩

右击“Transient”，选择 Insert→Joint Load，则在细节窗口出现如图 20-15 所示的“转动副细节”设置面板，选择“Joint”为“Revolute-Ground To Part3-1”，设置“Type”为“Moment”，力矩大小为“80N・m”。

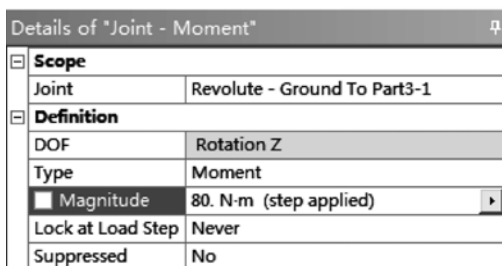


图 20-15　“转动副细节”设置面板

4．求解

选择 Transient→Solution，右击“Solution”，选择“Solve”。

5．查看结果

图 20-16～图 20-19 分别给出了斜齿轮装配体不同时刻的等效应力云图，图 20-20 和图 20-21 分别给出了斜齿轮装配体不同时刻的接触压力云图，图 20-22 和图 20-23 分别给出了斜齿轮装配体等效应力和接触压力与计算时间的关系，具体查看方法读者可以参见本章的视频教程。

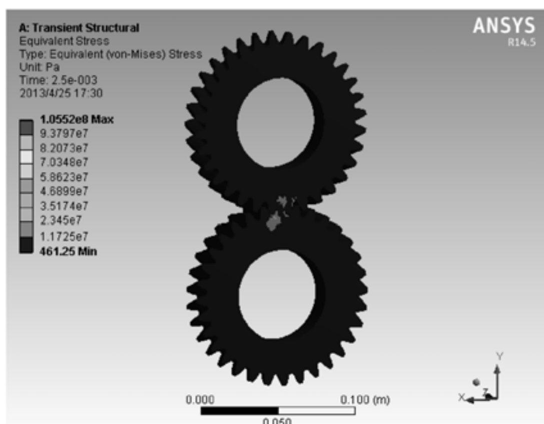


图 20-16　0.0025s 时刻的等效应力云图

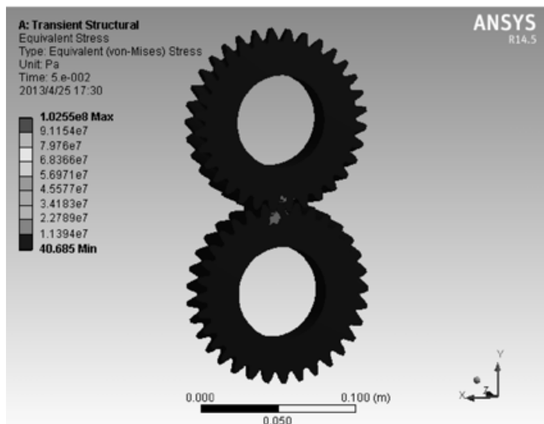


图 20-17　0.05s 时刻的等效应力云图

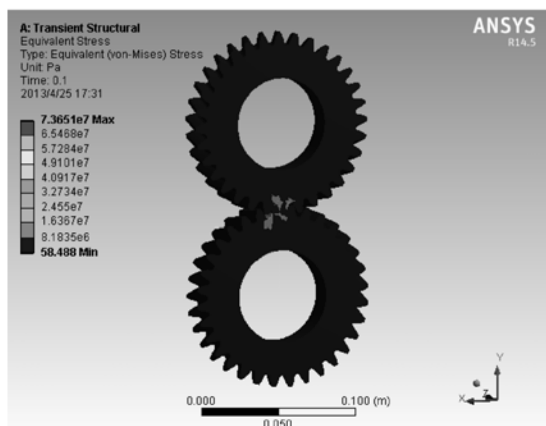


图 20-18　0.1s 时刻的等效应力云图

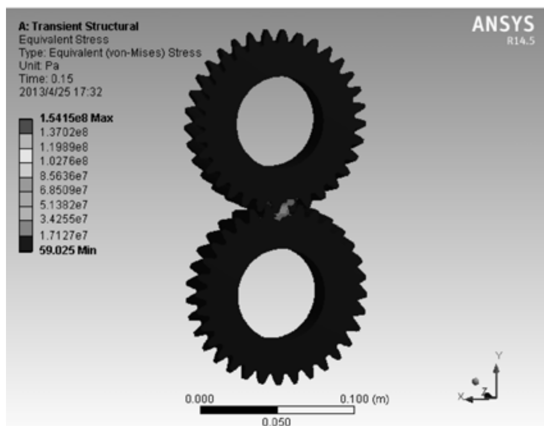


图 20-19　0.15s 时刻的等效应力云图

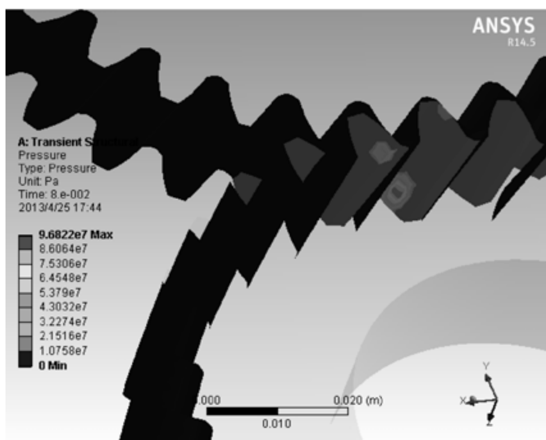


图 20-20　0.08s 时刻的接触压力云图

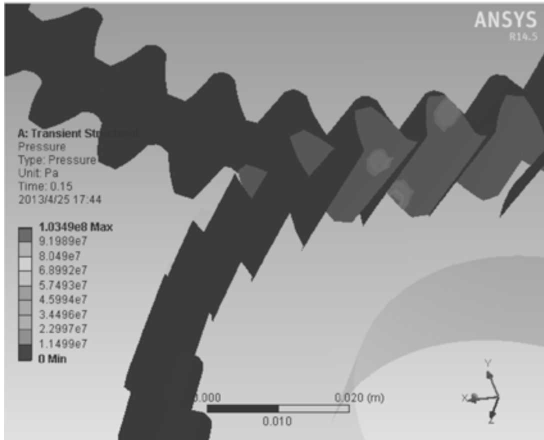


图 20-21　0.15s 时刻的接触压力云图

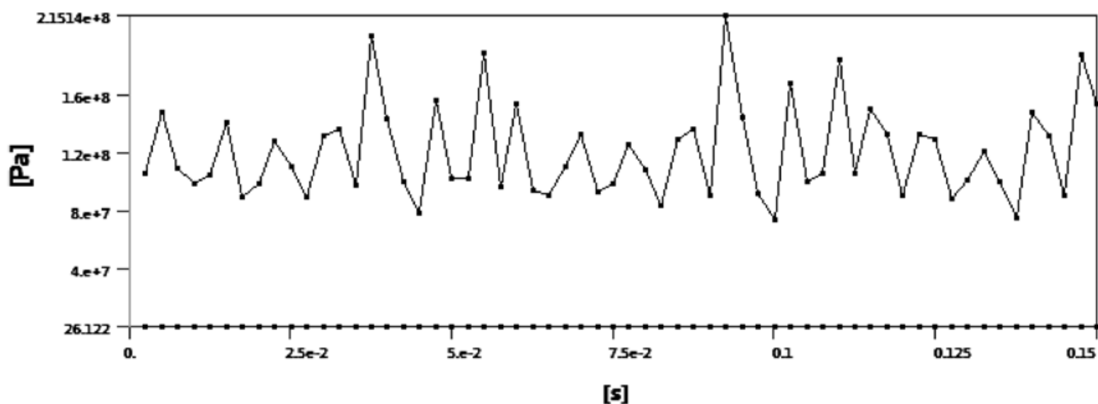


图 20-22　斜齿轮动态接触等效应力与时间的关系

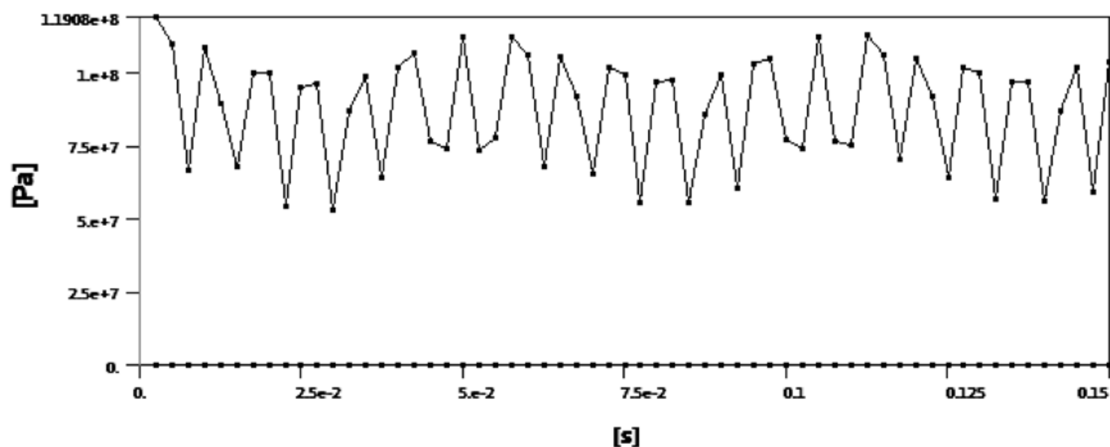


图 20-23　斜齿轮动态接触接触压力与时间的关系



第 21 例 振动平台的响应谱分析

21.1 实例覆盖的知识点

读者通过学习该实例可以掌握如下 Workbench 的知识点。

1）使用 Workbench 进行响应谱分析的基本步骤。

2）模态分析的基本设置方法。

3）响应谱分析的基本设置方法。

4）输入响应谱值的方法。

21.2 模型

21.2.1 几何模型

如图 21-1 给出了振动平台的三维模型，该平台由 4 个支撑细圆柱和一个平台组成。

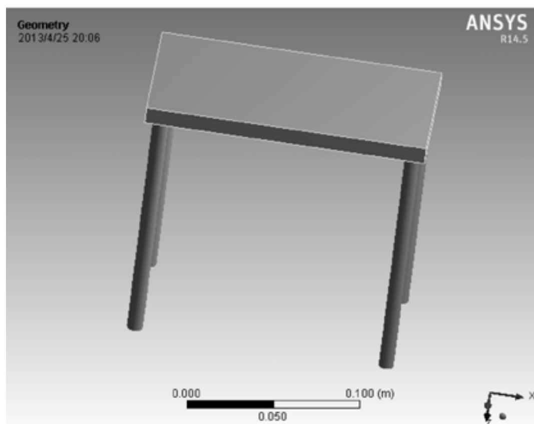


图 21-1 振动平台的三维模型

21.2.2 材料参数

该振动平台的材料参数如下：弹性模量为 1.8E11Pa，泊松比为 0.31，密度为 7200kg/m^3，该结构的常数阻尼比为 0.01。

21.2.3 边界条件和载荷

完全约束振动平台 4 个支撑圆柱的底面，并且在该约束面作用 X 方向的速度谱，表 21-1

给出了速度谱与频率的关系。

表 21-1　速度谱与频率的关系

频率/Hz	1	100	500	1000	2000	3000	4000
速度谱/（$m{\cdot}s^{-1}$）	0.02	0.04	0.082	0.092	0.12	0.02	0.025

21.3　GUI 操作

21.3.1 创建响应谱分析系统

启动 Workbench，双击“Workbench Custom Systems”的“Response Spectrum”，弹出如图 21-2 所示的“响应谱分析系统”工程图，该系统由模态分析和响应谱分析系统组成。

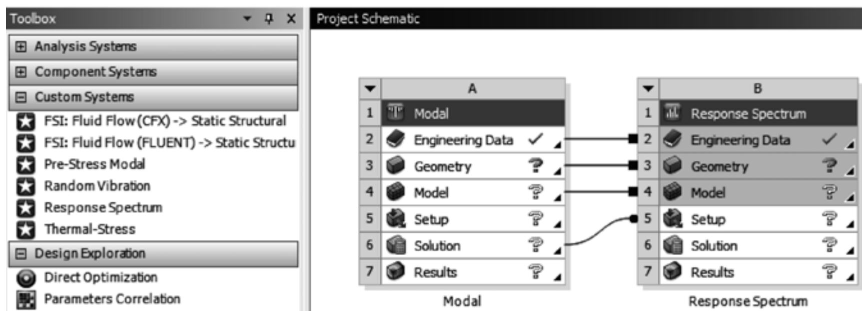


图 21-2　“响应谱分析系统”工程图

21.3.2 定义材料数据

单击谐响应分析系统中的“Engineering Data”子模块，选择“Structural Steel”上的结构钢选项，弹出如图 21-3 所示的“结构钢材料”数据列表，重新输入密度为“7200”，杨氏模量设置为“1.8E11”，泊松比为“0.31”，然后单击“Update Project”，最后单击“Return to Project”按钮。

Properties of Outline Row 3: Structural Steel

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Density	7200	kg m^-3		
3	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion				
4	Coefficient of Thermal Expansion	1.2E-05	C^-1		
5	Reference Temperature	22	C		
6	Isotropic Elasticity				
7	Derive from	Young's M...			
8	Young's Modulus	1.8E+11	Pa		
9	Poisson's Ratio	0.31			
10	Bulk Modulus	1.5789E+11	Pa		
11	Shear Modulus	6.8702E+10	Pa		

图 21-3　“结构钢材料”数据列表

21.3.3 建立几何模型

如图 21-4 所示，右击模态分析系统中的几何体选项，选择 Import Geometry→Browse，打开工作目录文件夹，选择振动平台模型文件，单击“OK”按钮。

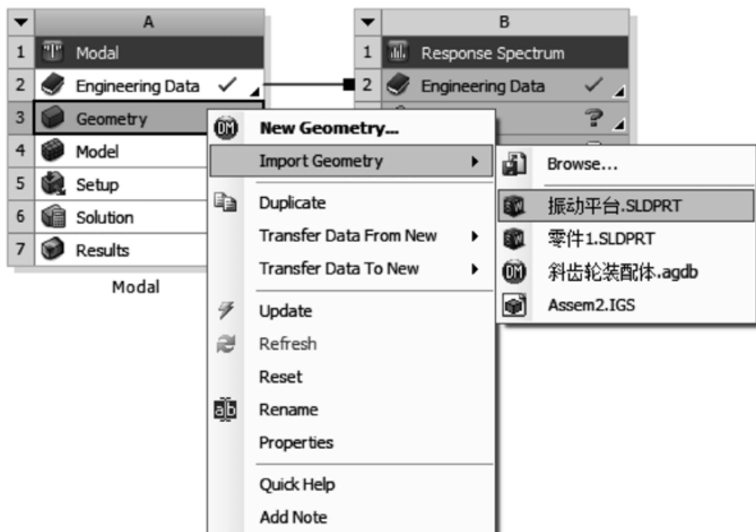


图 21-4 导入模型

21.3.4 创建有限元模型

单击模态分析系统中的“Modal”选项，进入响应谱分析系统，图 21-5 给出了“响应谱分析”流程图，由图可知响应谱分析由模态分析和响应谱分析组成，在响应谱分析之前必须要进行模态分析，通过获得模态振型和固有频率来进行后面的响应谱分析。

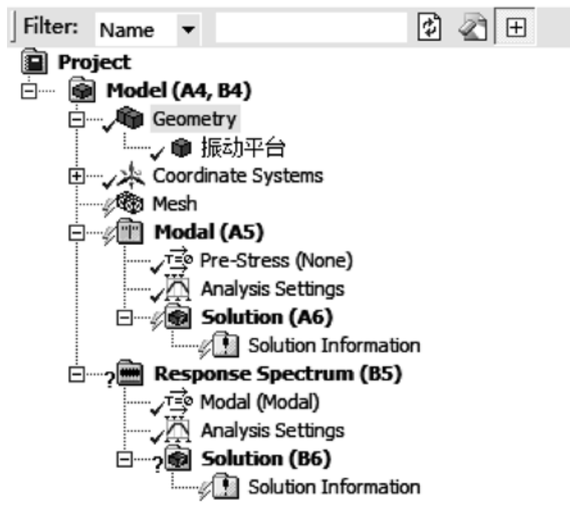


图 21-5 “响应谱分析”流程图

1．为振动平台赋予材料

单击 Model→Geometry→振动平台，则弹出如图 21-6 所示的“振动平台细节”设置面板，用户一般只需设置该面板的两个子选项，即“Definition”和“Material”选项。在“Definition”选项中，用户可以设置模型的“Stiffness Behavior”“Coordinate System”和“Reference Temperature”，在“Material”选项中可以为模型指定“Assignment”，本实例选用材料为“Structural Steel”。

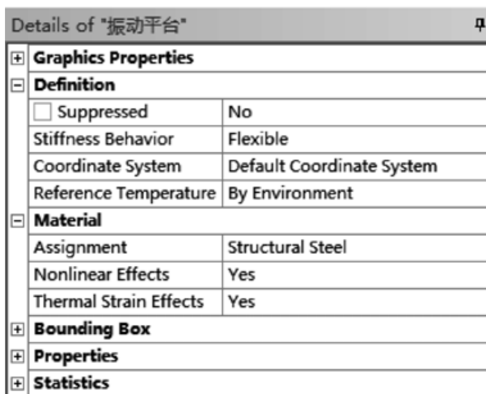


图 21-6 “振动平台细节”设置面板

2．网格划分

单击“Mesh”按钮，弹出如图 21-7 所示的“网格划分细节”设置面板，设置“Relevance Center”为“Fine”，其他保持默认设置，然后右击“Mesh”，选择“Generate Mesh”。

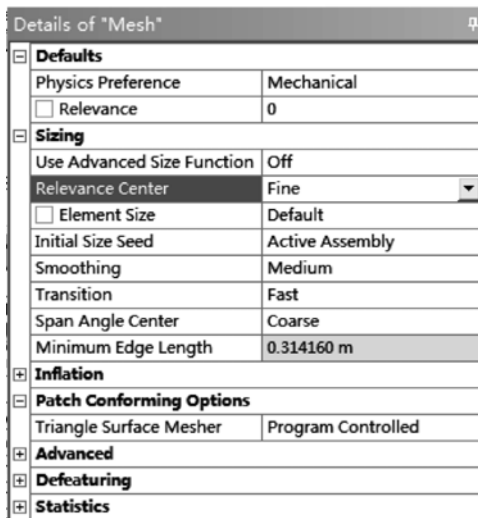


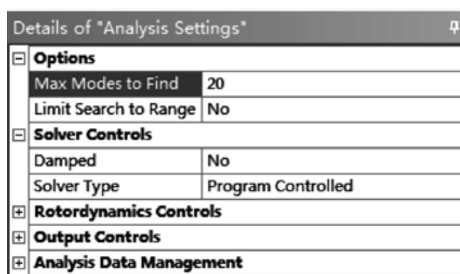
图 21-7 “网格划分细节”设置面板

21.3.5 模态分析

1．模态分析基本设置

单击“Modal”下方的“Analysis Settings”，则在细节窗口出现如图 21-8 所示的“模态

分析细节”设置面板，设置“Max Modes to Find”为“20”，其他保持默认设置。

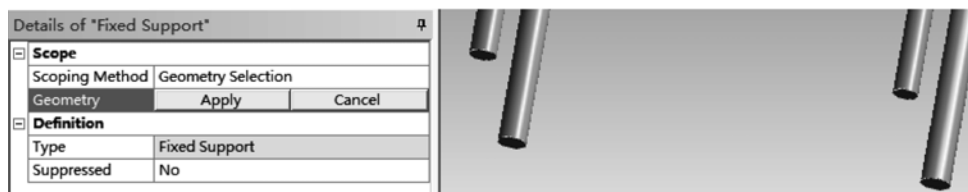

Details of "Analysis Settings"

Options	
Max Modes to Find	20
Limit Search to Range	No
Solver Controls	
Damped	No
Solver Type	Program Controlled
Rotordynamics Controls	
Output Controls	
Analysis Data Management	

图 21-8 “模态分析细节”设置面板

2．定义振动平台支撑柱底面约束

右击“Modal”，选择 Insert→Fixed Support，则在细节窗户出现如图 21-9 所示的“固定约束细节”设置面板，选择振动平台支撑柱底面约束，单击“Apply”按钮。


Details of "Fixed Support"

Scope		
Scoping Method	Geometry Selection	
Geometry	Apply	Cancel
Definition		
Type	Fixed Support	
Suppressed	No	

图 21-9 “固定约束细节”设置面板

3．求解

选择 Modal→Solution，右击“Solution”，选择“Solve”。

4．查看结果

图 21-10～图 21-12 分别给出了轮盘的前 3 阶振型云图，图 21-13 给出了振动平台计算的前 10 阶固有频率。

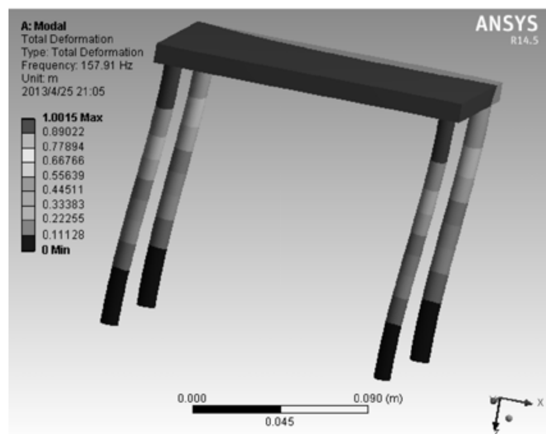


图 21-10 振动平台 1 阶模态振型云图

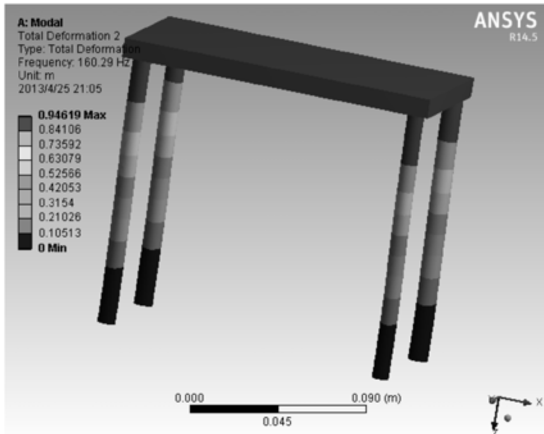


图 21-11 振动平台 2 阶模态振型云图

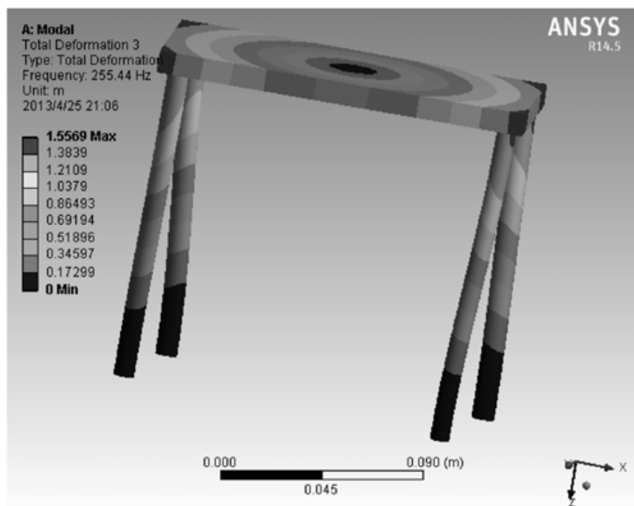


图 21-12　振动平台 3 阶模态振型云图

	Mode	Frequency [Hz]
1	1.	157.91
2	2.	160.29
3	3.	255.44
4	4.	1046.4
5	5.	1819.4
6	6.	1838.7
7	7.	1935.7
8	8.	1944.
9	9.	2027.3
10	10.	2064.2

图 21-13　振动平台前 10 阶固有频率列表

21.3.6 响应谱分析

1．响应谱分析置

单击“Response Spectrum”下方的“Analysis Settings”，则在细节窗口出现如图 21-14 所示的“响应谱分析细节”设置面板，设置“Modes Combination Type”为“CQC”，“Constant Damping Ratio”为“0.01”，其他保持默认设置。

2．定义速度谱

右击“Response Spectrum”，选择 Insert→RS Velocity，则在细节窗口出现如图 21-15 所示的“速度谱细节”设置面板，设置边界条件为“All BC Supports”，载荷数据类型为“Tabular Data”，激励方向为“X Axis”，图 21-16 给出了速度谱与频率的输入表格，按照图 21-16 进行输入。

Details of "Analysis Settings"

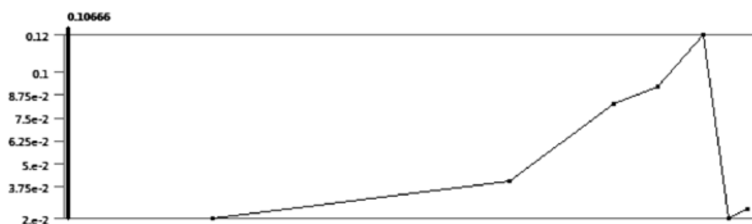
Options	
Number Of Modes To Use	All
Spectrum Type	Single Point
Modes Combination Type	CQC
Output Controls	
Damping Controls	
Constant Damping Ratio	1.e-002
Stiffness Coefficient Define By	Direct Input
Stiffness Coefficient	0.
Mass Coefficient	0.
Analysis Data Management	

图 21-14　“响应谱分析细节”设置面板

Details of "RS Velocity"

Scope	
Boundary Condition	All BC Supports
Definition	
Load Data	Tabular Data
Scale Factor	1.
Direction	X Axis
Rigid Response Effect	No
Suppressed	No

图 21-15　“速度谱细节”设置面板



	Frequency [Hz]	Velocity [(m/s)]
1	1.	2.e-002
2	100.	4.e-002
3	500.	8.2e-002
4	1000.	9.2e-002
5	2000.	0.12
6	3000.	2.e-002
7	4000.	2.5e-002
*		

图 21-16　速度谱与频率的输入表格

3．求解

选择 Response Spectrum→Solution，右击“Solution”，选择“Solve”。

4．查看结果

图 21-17～图 21-20 分别给了振动平台响应谱分析的 3 个方向的平动位移云图和等效应力云图，具体查看方法读者可以参见本章的视频教程。

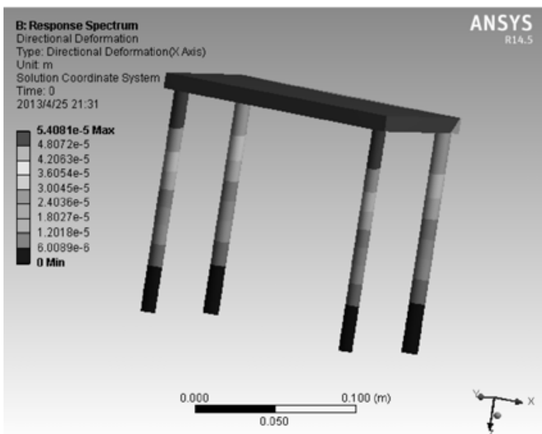


图 21-17　振动平台 X 方向的位移云图

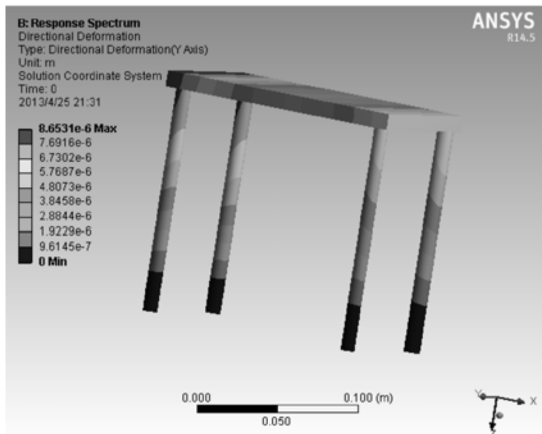


图 21-18　振动平台 Y 方向的位移云图

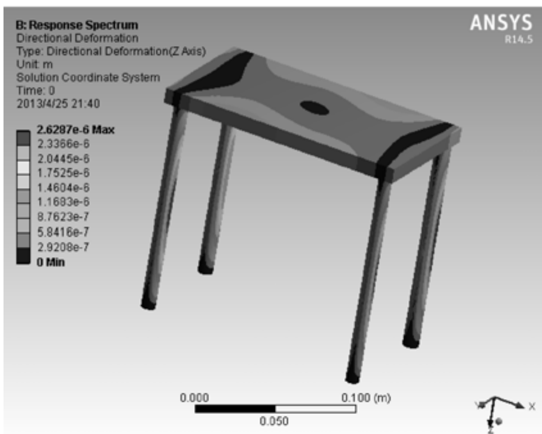


图 21-19　振动平台 Z 方向的位移云图

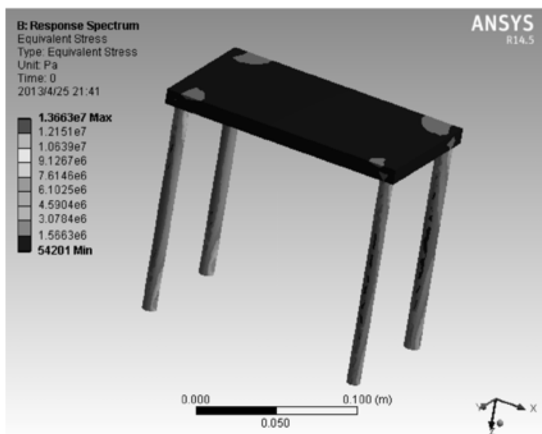


图 21-20　振动平台的等效应力云图

第 22 例　齿轮轴的随机振动分析

22.1　实例覆盖的知识点

读者通过学习该实例可以掌握如下 Workbench 的知识点。

1）使用 Workbench 进行随机振动分析的基本步骤。

2）模态分析的基本设置方法。

3）随机振动分析的基本设置方法。

4）输入加速度谱值的方法。

5）随机振动考虑阻尼的方法。

22.2　模型

22.2.1　几何模型

图 22-1 给出了齿轮轴的单位模型，该齿轮轴为 1 个整体零件，上面加工有 3 个齿轮。

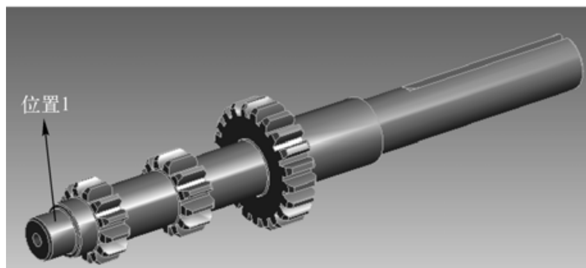


图 22-1　齿轮轴的三维模型

22.2.2　材料参数

该齿轮轴的材料参数如下：弹性模量为 2.12E11Pa，泊松比为 0.31，密度为 7500kg/m^3，该结构的常数阻尼比为 0.005。

22.2.3　边界条件和载荷

完全约束图 22-1 所示的位置 1，并且在位置处施加两个方向的加速度功率谱，加速度功率谱值与频率的关系如表 22-1 所示。



表 22-1　加速度 PSD 与频率的关系

频率/Hz	1	100	800	1200	2000	5000	8000	10000
速度谱/[$(m/s^2)^2 \cdot Hz^{-1}$]	1.79E-4	3.4E-3	1.87E-3	2.89E-3	8.78E-4	6.53E-4	1.26E-4	8.9E-4

22.3　GUI 操作

22.3.1　创建随机振动分析系统

启动 Workbench，双击 Workbench Custom Systems 的“Custom Systems”下方的“Random Vibration”，弹出如图 22-2 所示的“随机振动分析系统”工程图，该系统由模态分析和随机振动分析系统组成。

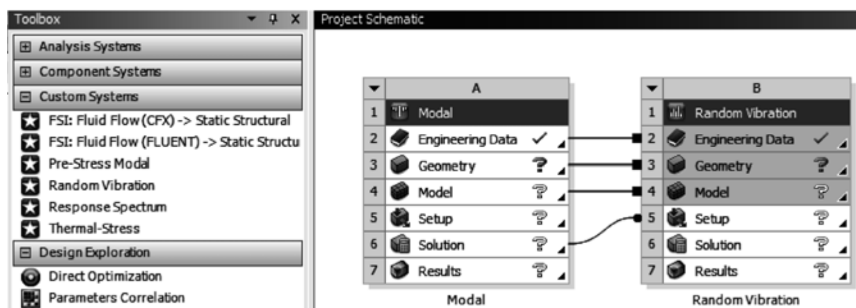


图 22-2　“随机振动分析系统”工程图

22.3.2　定义材料数据

单击随机振动分析系统中模态分析的“Engineering Data”子模块，选择“Structural Steel”上的“结构钢”选项，弹出如图 22-3 所示的“结构钢材料”数据列表，重新输入密度为“7500”，杨氏模量设置为“2.12E11”，泊松比为“0.31”，然后单击“Update Project”，最后单击“Return to Project”按钮。

Chart : Young's Modulus Outline Row 3: Structural Steel

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Density	7500	kg m^-3		
3	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion				
4	Coefficient of Thermal Expansion	1.2E-05	C^-1		
5	Reference Temperature	22	C		
6	Isotropic Elasticity				
7	Derive from	Young's M...			
8	Young's Modulus	2.12E+11	Pa		
9	Poisson's Ratio	0.31			
10	Bulk Modulus	1.8596E+11	Pa		
11	Shear Modulus	8.0916E+10	Pa		

图 22-3　“结构钢材料”数据列表

22.3.3 建立几何模型

如图 22-4 所示，右击模态分析系统中的几何体选项，选择 Import Gemoetry→Browse，打开工作目录文件夹，选择齿轮轴模型文件，单击“OK”按钮。

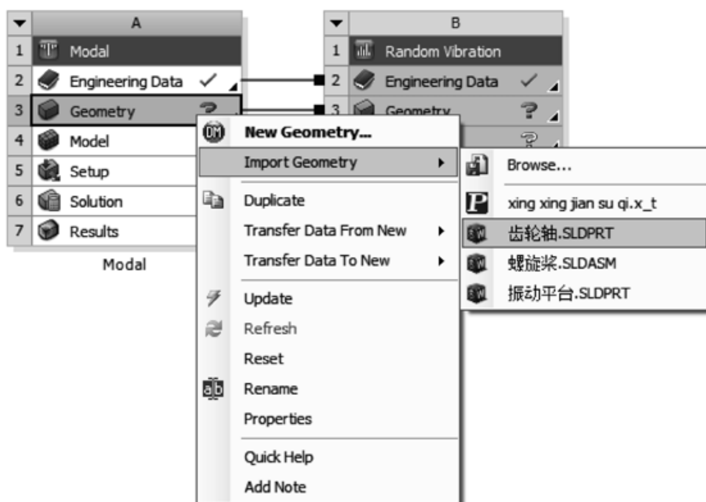


图 22-4　导入模型

22.3.4 创建有限元模型

单击模态分析系统中的“Modal”选项，进入随机振动分析系统，图 22-5 给出了“随机振动分析”流程图，由图可知随机分析由模态分析和随机分析组成，在随机振动分析之前必须要进行模态分析，通过获得模态振型和固有频率来进行后面的随机振动分析。

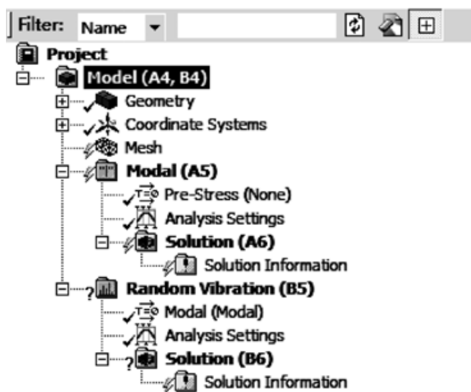
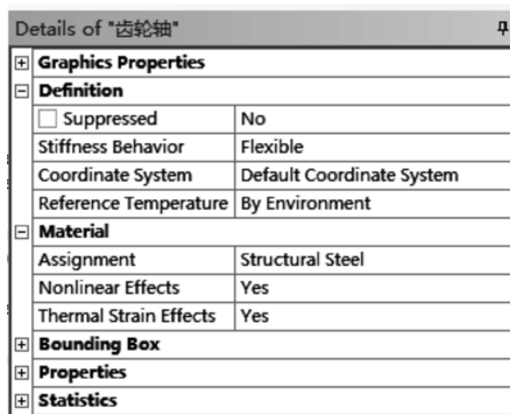


图 22-5　“随机振动分析”流程图

1．为齿轮轴赋予材料

单击 Model→Geometry→振动平台，则弹出如图 22-6 所示的“振动平台细节”设置面板，用户一般只需设置该面板的两个子选项，即“Definition”和“Material”选项。在“Definition”选项中，用户可以设置模型的“Stiffness Behavior”“Coordinate System”和

“Reference Temperature”，在“Material”选项中可以为模型指定“Assignment”，本实例选用材料为“Structural Steel”。

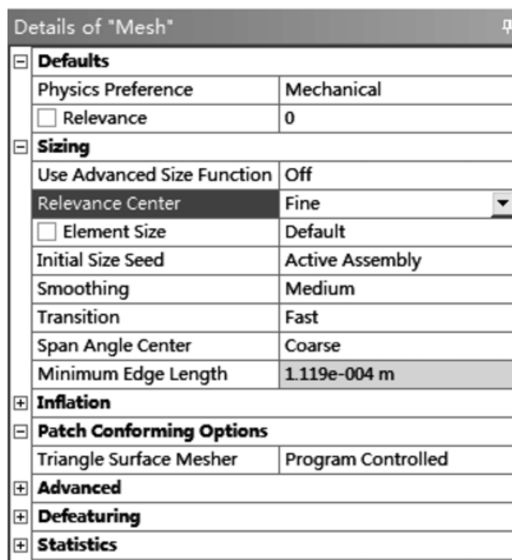

Details of "齿轮轴"

Graphics Properties	
Definition	
Suppressed	No
Stiffness Behavior	Flexible
Coordinate System	Default Coordinate System
Reference Temperature	By Environment
Material	
Assignment	Structural Steel
Nonlinear Effects	Yes
Thermal Strain Effects	Yes
Bounding Box	
Properties	
Statistics	

图 22-6 “振动平台细节”设置面板

2．网格划分

单击“Mesh”按钮，弹出如图 22-7 所示的“网格划分细节”设置面板，设置“Relevance Center”为“Fine”，其他保持默认设置，然后右击“Mesh”，选择“Generate Mesh”。


Details of "Mesh"

Defaults	
Physics Preference	Mechanical
Relevance	0
Sizing	
Use Advanced Size Function	Off
Relevance Center	Fine
Element Size	Default
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	Medium
Transition	Fast
Span Angle Center	Coarse
Minimum Edge Length	1.119e-004 m
Inflation	
Patch Conforming Options	
Triangle Surface Mesher	Program Controlled
Advanced	
Defeaturing	
Statistics	

图 22-7 “网格划分细节”设置面板

22.3.5 模态分析

1．模态分析基本设置

单击“Modal”下方的“Analysis Settings”，则在细节窗口出现如图 22-8 所示的“模态分析细节”设置面板，设置“Max Modes to Find”为“30”，其他保持默认设置。

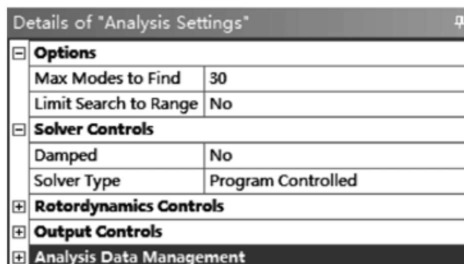


图 22-8 “模态分析细节”设置面板

2．定义齿轮轴的位移约束

右击“Modal”，选择 Insert→Displacement，则在细节窗口出现如图 22-9 所示的“位移约束细节”设置面板，选择齿轮轴的位置 1，单击“Apply”按钮，输入 3 个方向的位移约束都为“0”。

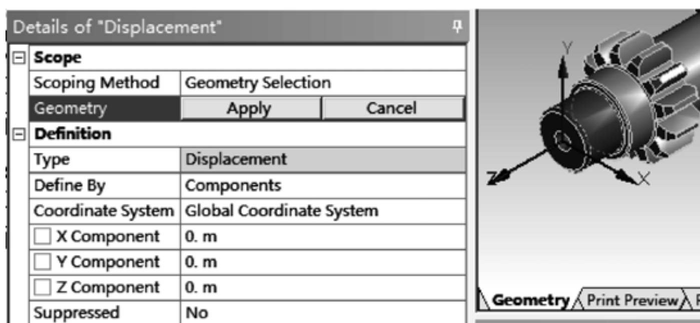


图 22-9 “位移约束细节”设置面板

3．求解

选择 Modal→Solution，右击“Solution”，选择“Solve”。

4．查看模态求解的结果

图 21-10～图 21-12 分别给出了齿轮轴的前 3 阶振型云图，图 21-13 给出了齿轮轴计算的前 10 阶固有频率。

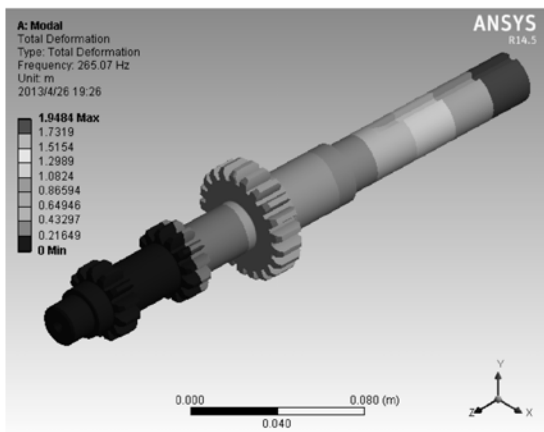


图 22-10 齿轮轴 1 阶模态振型云图

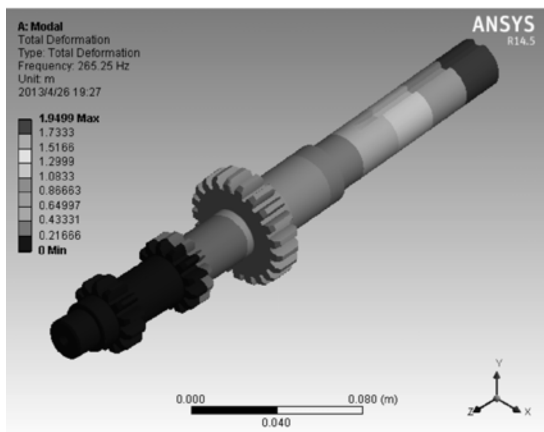


图 22-11 齿轮轴 2 阶模态振型云图

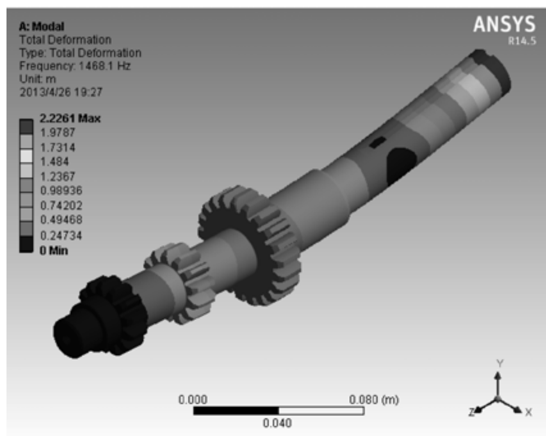


图 22-12　齿轮轴 3 阶模态振型云图

	Mode	Frequency [Hz]
1	1.	265.07
2	2.	265.25
3	3.	1468.1
4	4.	1474.9
5	5.	2217.1
6	6.	3814.5
7	7.	3878.2
8	8.	4671.2
9	9.	7118.9
10	10.	7436.

图 22-13　齿轮轴前 10 阶固有频率列表

22.3.6 随机振动分析

1．随机振动分析置

单击“Random Vibration”下方的“Analysis Settings”，则在细节窗口出现如图 22-14 所示的“随机振动分析细节”设置面板，“Constant Damping Ratio”为“0.005”，其他保持默认设置。

2．定义加速度谱

（1）定义 X 方向的加速度谱

右击“Random Vibration”，选择 Insert→PSD Acceleration，则在细节窗口出现如图 22-15 所示的“加速度谱细节”设置窗口，设置边界条件为“Displacement”，方向为“X Axis”，图 22-16 给出了 X 方向加速度功率谱密度与频率的关系，用户根据图 22-16 进行输入。

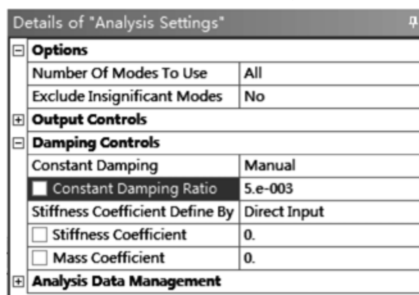


图 22-14　“随机振动分析细节”设置面板

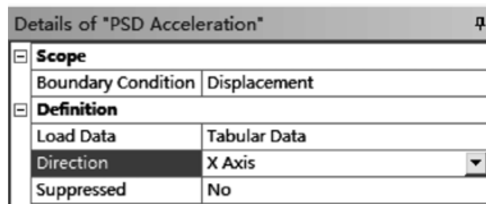
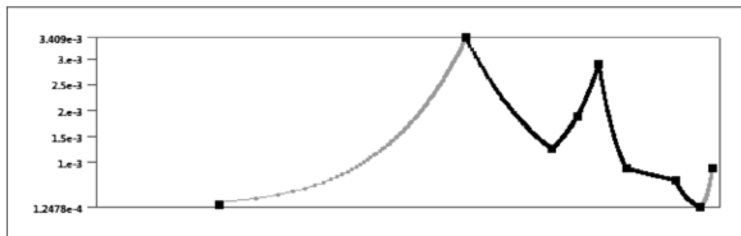


图 22-15　“加速度谱细节”设置面板



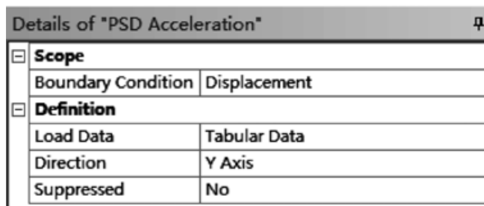
	Frequency [Hz]	Acceleration [(m/s²)²/Hz]
1	1.	1.79e-004
2	100.	3.4e-003
3	500.	1.25e-003
4	800.	1.87e-003
5	1200.	2.89e-003
6	2000.	8.78e-004
7	5000.	6.53e-004
8	8000.	1.26e-004
9	10000	8.9e-004

图 22-16　X 方向加速度功率谱密度与频率的关系



（2）定义 Y 方向的加速度谱

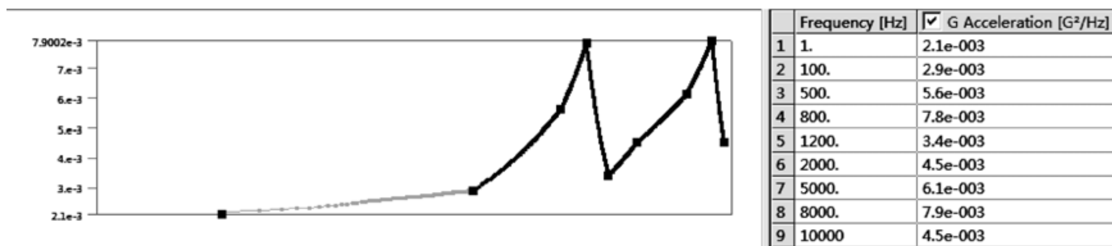
右击“Random Vibration”，选择 Insert→PSD Acceleration，则在细节窗口出现如图 22-17 所示的“加速度谱细节”设置面板，设置边界条件为“Displacement”，方向为“Y Axis”，图 22-18 给出了 Y 方向加速度功率谱密度与频率的关系，用户根据图 22-16 进行输入。



Details of "PSD Acceleration"

Scope	
Boundary Condition	Displacement
Definition	
Load Data	Tabular Data
Direction	Y Axis
Suppressed	No

图 22-17 “加速度谱细节”设置面板



	Frequency [Hz]	G Acceleration [G²/Hz]
1	1.	2.1e-003
2	100.	2.9e-003
3	500.	5.6e-003
4	800.	7.8e-003
5	1200.	3.4e-003
6	2000.	4.5e-003
7	5000.	6.1e-003
8	8000.	7.9e-003
9	10000	4.5e-003

图 22-18 Y 方向加速度功率谱密度与频率的关系

3．求解

选择 Random vibration→Solution，右击“Solution”，选择“Solve”。

4．查看结果

图 22-19～图 22-22 分别给出了齿轮轴的 3 个方向的位移云图和等效应力云图，具体查看方法读者可以参见本章的视频教程。

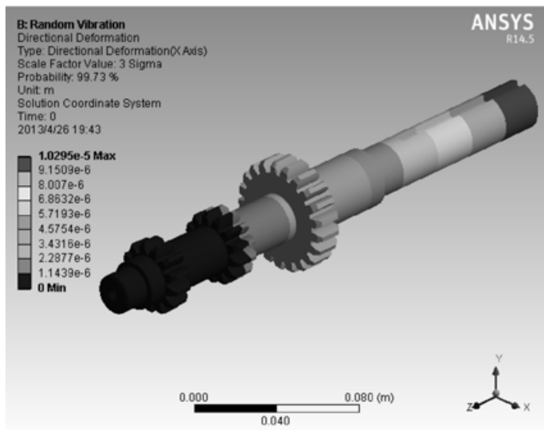


图 22-19 置信度为 99.73%的 X 方向位移云图

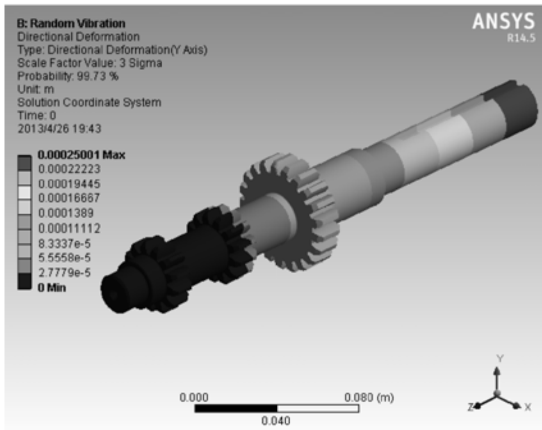


图 22-20 置信度为 99.73%的 Y 方向位移云图

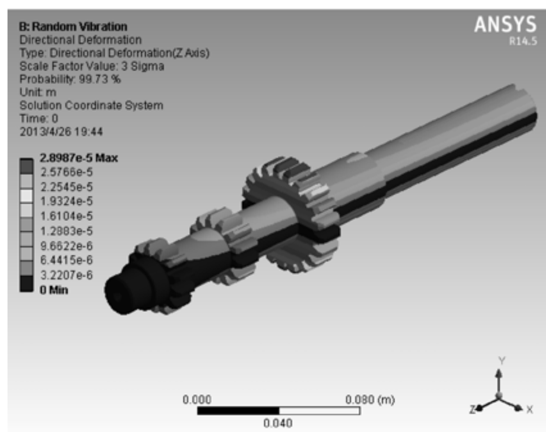


图 22-21　置信度为 99.73%的 Z 方向位移云图

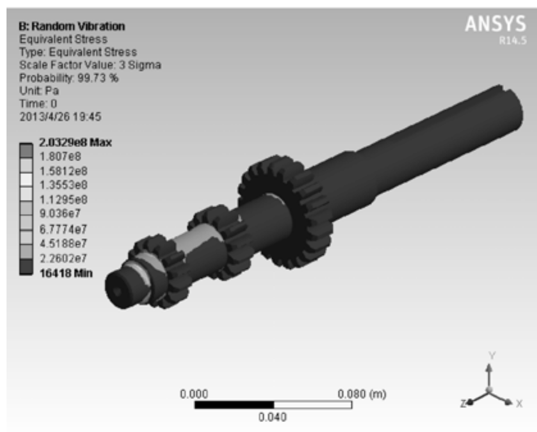


图 22-22　置信度为 99.73%的等效应力云图

第 23 例　细长管的线性屈曲分析

23.1　实例覆盖的知识点

读者通过学习该实例可以掌握如下 Workbench 的知识点。

1）使用 Workbench 进行线性屈曲分析的基本步骤。

2）模态分析的基本设置方法。

3）线性屈曲分析的基本设置方法。

4）判断线性屈曲失效载荷的方法。

23.2　模型

23.2.1 几何模型

图 23-1 给出了细长管的三维模型，该细长管的内径为 70mm，外径为 80mm，长度为1200mm。

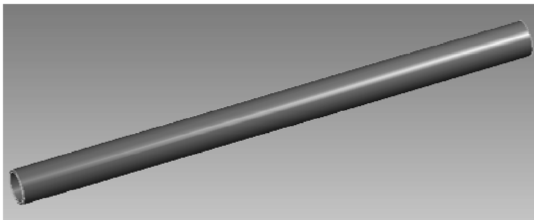


图 23-1　细长管的三维模型

23.2.2 材料参数

该细长管的材料参数如下：弹性模量为 2.12E11Pa，泊松比为 0.31。

23.2.3 边界条件和载荷

完全约束细长管的一侧端面，在另一侧端面施加一个单位力，即 1N 的集中力。

23.3　GUI 操作

23.3.1 创建线性屈曲分析系统

启动 Workbench，双击 Workbench 中“Toolbox”的“Static Structural”，则在“Project

Schembc”中出现静力学分析系统，右击静力学中的“Solution”，选择 Transfer Data To New →Linear Buckling，通过以上操作实现将静力学结果传递到线性屈曲分析，从而搭建了线性屈曲分析系统，最终分析系统如图 23-2 所示的线性屈曲分析系统。

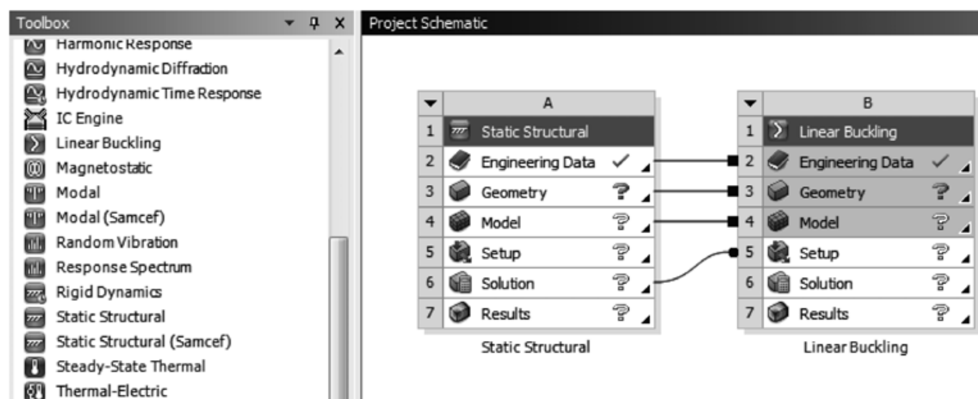


图 23-2 线性屈曲分析系统

23.3.2 定义材料数据

单击静力学分析系统中的“Engineering Data”子模块，选择“Structural Steel”上的结构钢选项，弹出如图 23-3 所示的“结构钢材料”数据列表，重新输入杨氏模量设置为“2.12E11”，泊松比为“0.31”，然后单击“Update Project”，最后单击“Return to Project”按钮。

Properties of Outline Row 3: Structural Steel

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Density	7850	kg m^-3		
3	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion				
4	Coefficient of Thermal Expansion	1.2E-05	C^-1		
5	Reference Temperature	22	C		
6	Isotropic Elasticity				
7	Derive from	Young's M...			
8	Young's Modulus	2.12E+11	Pa		
9	Poisson's Ratio	0.31			
10	Bulk Modulus	1.8596E+11	Pa		
11	Shear Modulus	8.0916E+10	Pa		
12	Alternating Stress Mean Stress	Tabular			

图 23-3 “结构钢材料”数据列表

23.3.3 建立几何模型

如图 23-4 所示，右击静力学分析系统中的几何体选项，选择 Import Geometry→

Browse，打开工作目录文件夹，选择细长管模型文件，单击“OK”按钮。



图 23-4　导入模型

23.3.4 创建有限元模型

选择静力学分析系统中的“Modal”选项，进入线性屈曲分析系统，图 23-5 给出了“线性屈曲分析”流程图，由图可知线性屈曲分析由静力学分析和线性屈曲分析组成，在线性屈曲分析之前必须要进行静力学分析，通过获得静力学分析中的刚度来进行后面的线性屈曲分析。

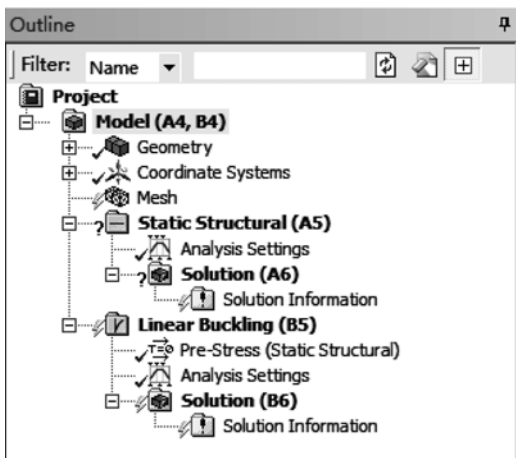
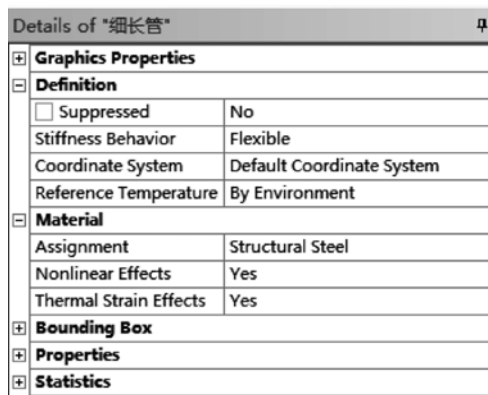


图 23-5　“线性屈曲分析”流程图

1．为细长管平台赋予材料

单击 Model→Geometry→细长管，则弹出如图 23-6 所示的“细长管细节”设置面板，

用户一般只需设置该面板的两个子选项，即“Definition”和“Material”选项。在“Definition”选项中，用户可以设置模型的“Stiffness Behavior”“Coordinate System”和“Reference Temperature”，在“Material”选项中可以为模型指定“Assignment”，本实例选用材料为“Structural Steel”。



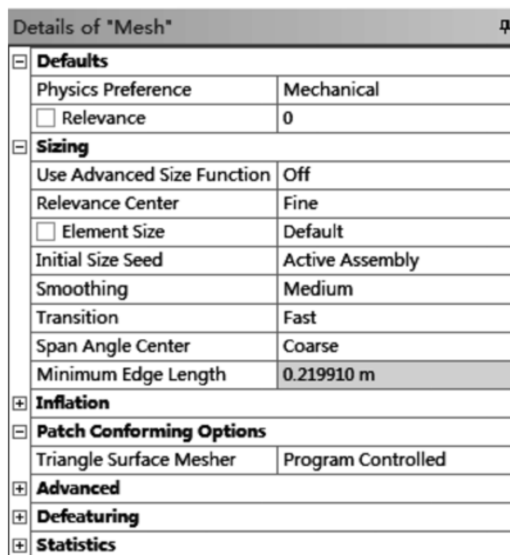
Details of "细长管"

Graphics Properties	
Definition	
Suppressed	No
Stiffness Behavior	Flexible
Coordinate System	Default Coordinate System
Reference Temperature	By Environment
Material	
Assignment	Structural Steel
Nonlinear Effects	Yes
Thermal Strain Effects	Yes
Bounding Box	
Properties	
Statistics	

图 23-6 “细长管细节”设置面板

2．网格划分

单击“Mesh”按钮，弹出如图 23-7 所示的“网格划分细节”设置面板，设置“Relevance Center”为“Fine”，其他保持默认设置，然后右击“Mesh”，选择“Generate Mesh”。



Details of "Mesh"

Defaults	
Physics Preference	Mechanical
Relevance	0
Sizing	
Use Advanced Size Function	Off
Relevance Center	Fine
Element Size	Default
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	Medium
Transition	Fast
Span Angle Center	Coarse
Minimum Edge Length	0.219910 m
Inflation	
Patch Conforming Options	
Triangle Surface Mesher	Program Controlled
Advanced	
Defeaturing	
Statistics	

图 23-7 “网格划分细节”设置面板

23.3.5 静力学分析

1．定义细长管的固定约束

右击“Static Structural”，选择 Insert→Fixed Support，则在细节窗户出现如图 23-8 所示



的“固定约束细节”设置面板，选择细长管的底面约束，单击“Apply”按钮。

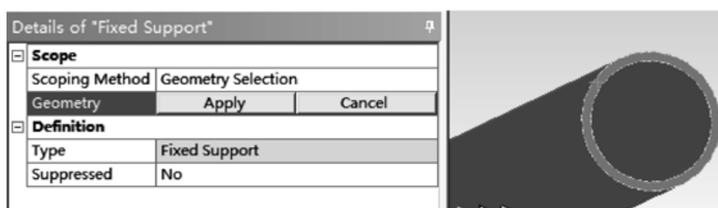


图 23-8 “固定约束细节”设置面板

2．定义细长管的集中力

右击“Static Structural”，选择 Insert→Force，则在细节窗口出现如图 23-9 所示的“力细节”设置面板，设置定义方式为“Components”，输入“Z Components=-1”，选择细长管的另一个端面单击“Apply”按钮。

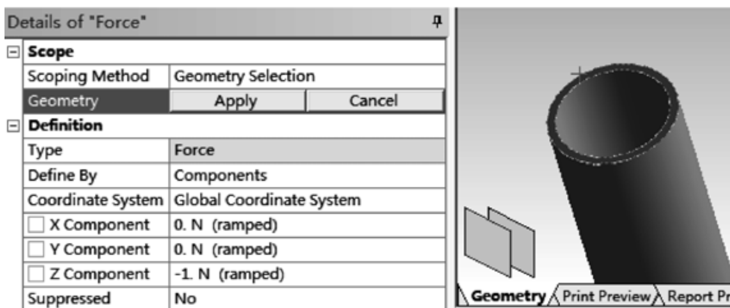


图 23-9 “力细节”设置面板

3．求解

选择 Static Structural→Solution，右击“Solution”，选择“Solve”。

4．查看结果

图 23-10 和图 23-11 分别给出了细长管的等效应力和总体变形云图，具体查看方法用户可以参见本章视频教程。

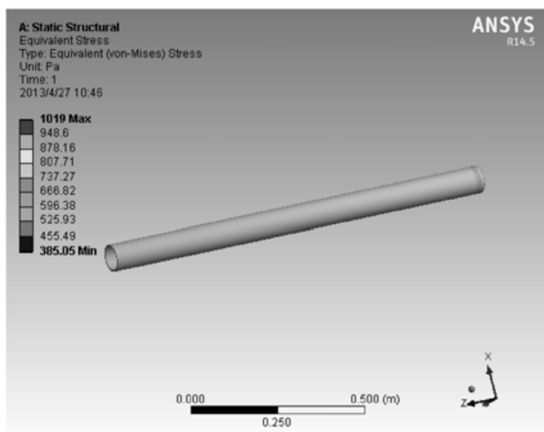


图 23-10 细长管等效应力云图

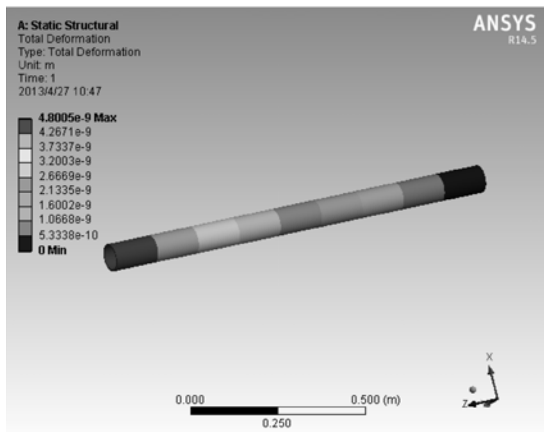


图 23-11 细长管总体变形云图

23.3.6 线性屈曲分析

1．线性屈曲分析设置

单击“Linear Buckling”下方的“Analysis Settings”，则在细节窗口出现如图 23-12 所示的“线性屈曲分析细节”设置面板，设置“Max Modes to Find”为“6”，其他保持默认设置。

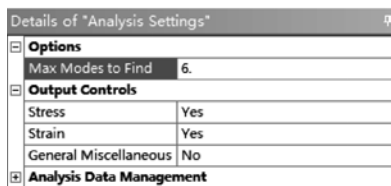


图 23-12 “线性屈曲分析细节”设置面板

2．求解

选择 Linear Buckling→Solution，右击“Solution”，选择“Solve”。

3．查看结果

图 23-13～图 23-16 分别给出了细长管的不同屈曲模态的变形，等效应力以及前 6 阶屈曲载荷乘子系数列表，由图 23-16 可知，该细长管的线性屈曲失效载荷为 3.0138E5N。

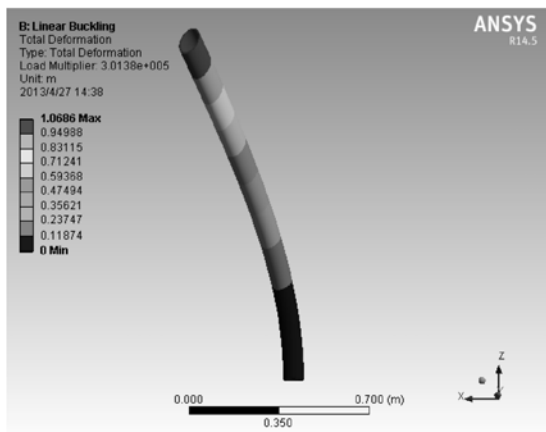


图 23-13 1 阶屈曲模态变形云图

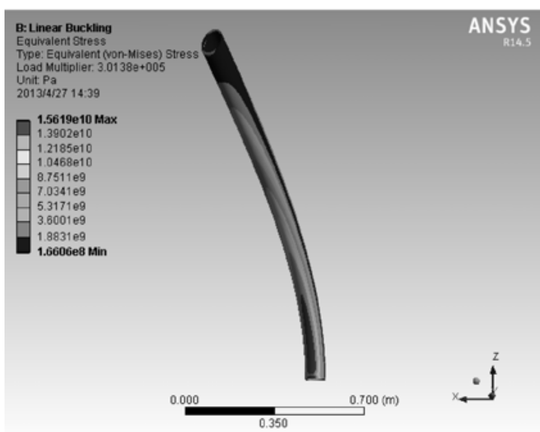


图 23-14 1 阶屈曲模态等效应力云图

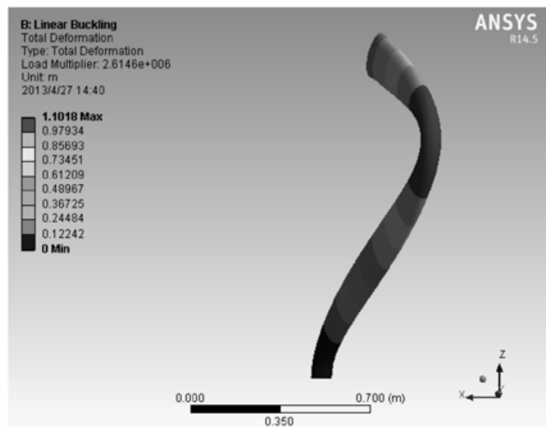


图 23-15 3 阶屈曲模态变形云图

	Mode	Load Multiplier
1	1.	3.0138e+005
2	2.	3.014e+005
3	3.	2.6146e+006
4	4.	2.6146e+006
5	5.	5.5258e+006
6	6.	5.5322e+006

图 23-16 屈曲分析载荷乘子列表

第 24 例　行星传动机构装配体的静力学分析

24.1　实例覆盖的知识点

读者通过学习该实例可以掌握如下 Workbench 的知识点。

1）装配体静力学分析的基本步骤。

2）装配体接触关系的定义方法。

3）施加力矩的方法。

4）施加圆柱约束的方法。

5）激活大变形的方法。

24.2　问题的描述

24.2.1 几何模型

图 24-1 给出了行星传动机构的三维模型，该行星传动机构由一个太阳轮，4 个行星轮和 1 个齿圈组成，其中太阳轮为动力输入端，行星轮为动力输出端。

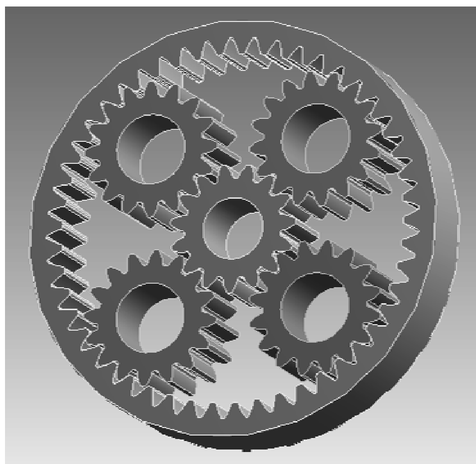


图 24-1　行星传动机构三维模型

24.2.2 材料参数

该行星传动机构的弹性模量为 2.13E11Pa，泊松比为 0.31。

24.2.3 边界条件和载荷

固定约束齿圈的外表面，使用圆柱约束行星齿轮和太阳轮的径向和轴向位移，在太阳轮的内孔上施加大小为 2000N・m 的扭矩。



24.3 GUI 操作

24.3.1 创建静力学分析系统

启动 Workbench，双击 Workbench Toolbox 的“Static Structural”，弹出如图 24-2 所示的“静力学分析系统”工程图。

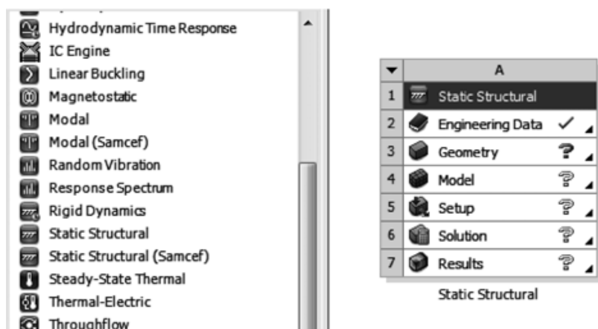


图 24-2 “静力学分析系统”工程图

24.3.2 定义材料数据

单击静力学分析系统中的“Engineering Data”子模块，选择“Structural Steel”上的结构钢选项，弹出如图 24-3 所示的“结构钢材料”数据表，重新输入密度为“7200”，杨氏模量设置为“2.13E11”，泊松比为“0.31”，然后单击“Update Project”，最后单击“Return to Project”按钮。

Properties of Outline Row 3: Structural Steel

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Density	7850	kg m^-3		
3	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion				
4	Coefficient of Thermal Expansion	1.2E-05	C^-1		
5	Reference Temperature	22	C		
6	Isotropic Elasticity				
7	Derive from	Young's ...			
8	Young's Modulus	2.13E+11	Pa		
9	Poisson's Ratio	0.31			
10	Bulk Modulus	1.8684E+11	Pa		
11	Shear Modulus	8.1298E+10	Pa		
12	Alternating Stress Mean Stress	Tabular			

图 24-3 “结构钢材料”数据表

24.3.3 建立几何模型

如图 24-4 所示，右击模态分析系统中的几何体选项，选择 Import Gemoetry→Browse，打开工作目录文件夹，选择行星传动结构模型文件，单击“OK”按钮。

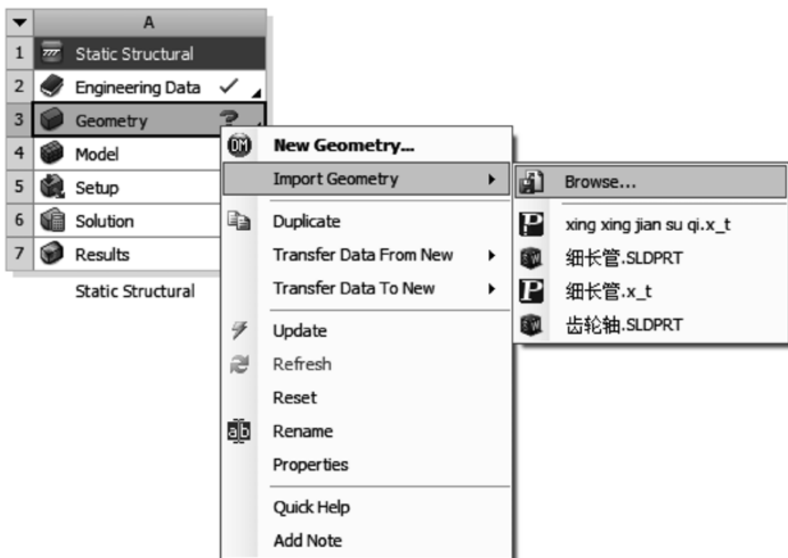


图 24-4　导入模型

24.3.4 创建有限元模型

选择静力学分析系统中的“Modal”选项，进入静力学分析系统，图 24-5 给出了“静力学分析系统”流程图。

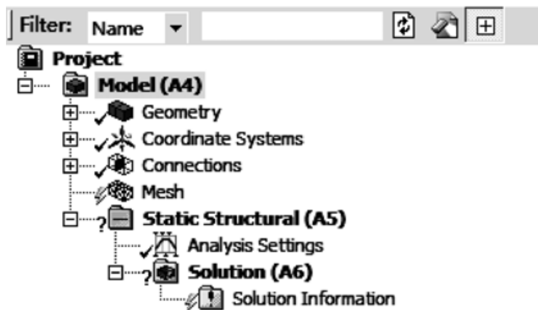


图 24-5 “静力学分析系统”流程图

1．为行星传动机构赋予材料

单击 Model→Geometry→Part1，则弹出如图 24-6 所示的“模型细节”设置面板，用户一般只需设置该面板的两个子选项，即“Definition”和“Material”选项。在“Definition”选项中，用户可以设置模型的“Stiffness Behavior”“Coordinate System”和“Reference Temperature”，在“Material”选项中可以为模型指定“Assignment”，本实例选用材料为

“Structural Steel”，按照图样操作设置 Part2 到 Part6 的材料参数。

Details of "Part 1"	
⊞ Graphics Properties	
⊟ Definition	
Suppressed	No
Stiffness Behavior	Flexible
Coordinate System	Default Coordinate System
Reference Temperature	By Environment
⊟ Material	
Assignment	Structural Steel
Nonlinear Effects	Yes
Thermal Strain Effects	Yes
⊞ Bounding Box	
⊞ Properties	
⊞ Statistics	
⊟ CAD Attributes	
PartTolerance	.000001

图 24-6 “模型细节”设置面板

2．网格划分

单击“Mesh”，弹出如图 24-7 所示的“网格划分细节”设置面板，设置“Relevance Center”为“Fine”，其他保持默认设置，然后右击“Mesh”，选择“Generate Mesh”。

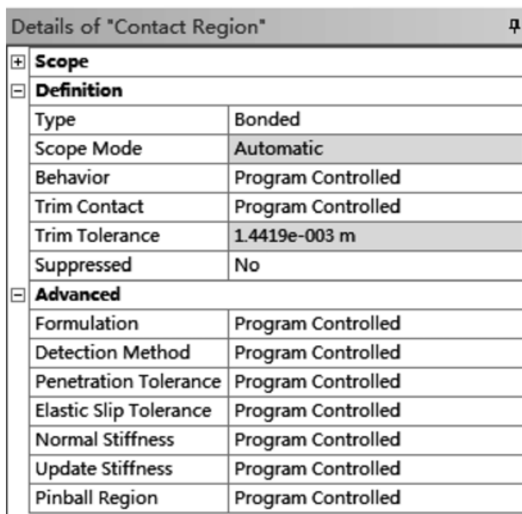
Details of "Mesh"	
⊟ Defaults	
Physics Preference	Mechanical
Relevance	0
⊟ Sizing	
Use Advanced Size Function	Off
Relevance Center	Fine
Element Size	Default
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	Medium
Transition	Fast
Span Angle Center	Coarse
Minimum Edge Length	0.314160 m
⊞ Inflation	
⊟ Patch Conforming Options	
Triangle Surface Mesher	Program Controlled
⊞ Advanced	
⊞ Defeaturing	
⊞ Statistics	

图 24-7 “网格划分细节”设置面板

3．定义行星机构装配体的接触关系

Workbench 具有自动检测行星机构装配体的接触关系，对于一般的静力学接触问题能够满足要求，选择 Connections→Contacts→Contact Region，则在细节窗口出现如图 24-8 所示

的“接触区域细节”设置面板，通过查看可以程序默认的接触类型为“Bonded”，满足求解需要。



Details of "Contact Region"

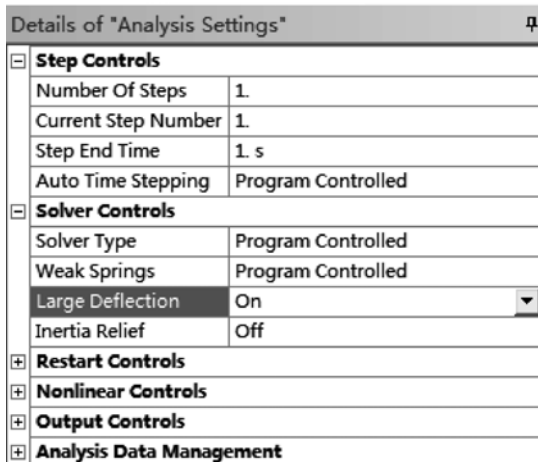
Scope	
Definition	
Type	Bonded
Scope Mode	Automatic
Behavior	Program Controlled
Trim Contact	Program Controlled
Trim Tolerance	1.4419e-003 m
Suppressed	No
Advanced	
Formulation	Program Controlled
Detection Method	Program Controlled
Penetration Tolerance	Program Controlled
Elastic Slip Tolerance	Program Controlled
Normal Stiffness	Program Controlled
Update Stiffness	Program Controlled
Pinball Region	Program Controlled

图 24-8 “接触区域细节”设置面板

24.3.5 静力学分析

1．静力学分析设置

单击“Static Structural”下方的“Analysis Settings”，则会出现如图 24-9 所示的“静力学求解分析细节设置”面板，设置“Large Deflection”为“On”，表明激活了大变形。



Details of "Analysis Settings"

Step Controls	
Number Of Steps	1.
Current Step Number	1.
Step End Time	1. s
Auto Time Stepping	Program Controlled
Solver Controls	
Solver Type	Program Controlled
Weak Springs	Program Controlled
Large Deflection	On
Inertia Relief	Off
Restart Controls	
Nonlinear Controls	
Output Controls	
Analysis Data Management	

图 24-9 “静力学分析细节”设置面板

2．定义固定约束

右击“Static Structural”，选择 Insert→Fixed Support，则在细节窗户出现如图 24-10 所示的“固定约束细节”设置面板，选择行星传动结构中齿圈的外圈，单击“Apply”按钮。

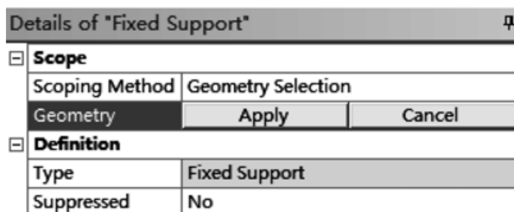


图 24-10 “固定约束细节”设置面板

3．定义圆柱约束

右击“Static Structural”，选择 Insert→Cylindrical Support，则在细节窗口出现如图 24-11 所示的“圆柱支撑细节”设置面板，选择行星齿轮和太阳轮内孔表面单击“Apply”按钮，设置“Tangential”为“Free”。

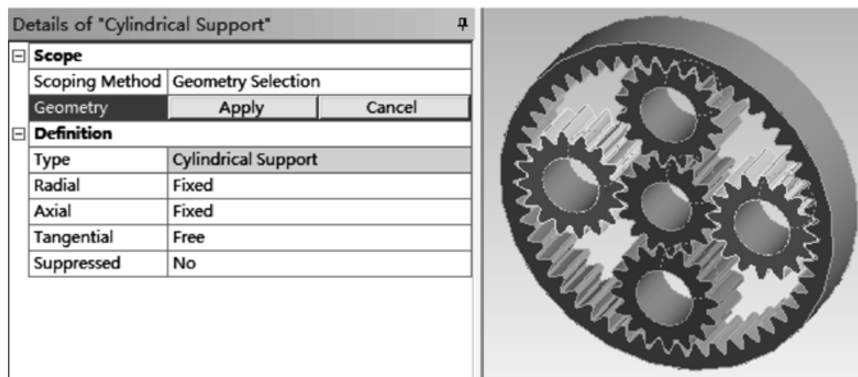


图 24-11 “圆柱支撑细节”设置面板

4．定义力矩

右击“Static Structural”，选择 Insert→Moment，则在细节窗口出现如图 24-12 所示的“力矩细节”设置面板，设置定义方式为“Components”，输入“Z Component”为“1500”，选择太阳轮的内孔表面，单击“Apply”按钮。

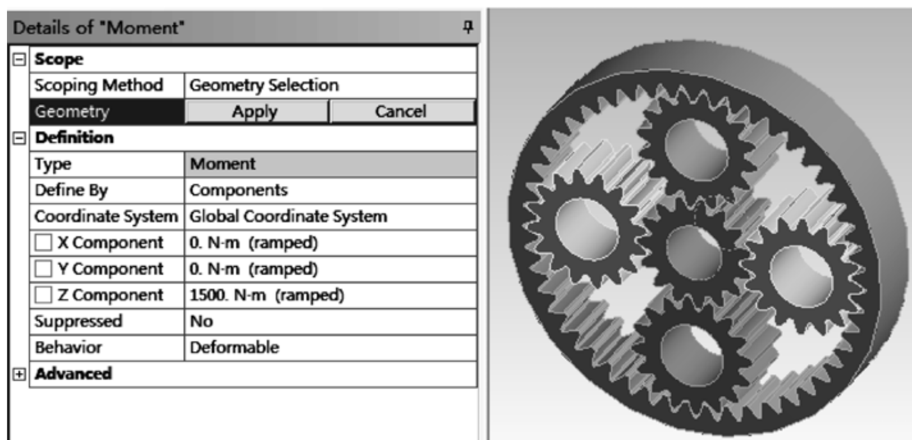


图 24-12 “力矩细节”设置面板

5．计算

选择 Static Structural→Solution，右击“Solution”，选择“Solve”。

6．观察结果

图 24-13～图 24-16 分别给出了行星传动机构的变形、等效应力、接触压力和接触间隙云图，具体查看方法读者可以参见本章的视频教程。

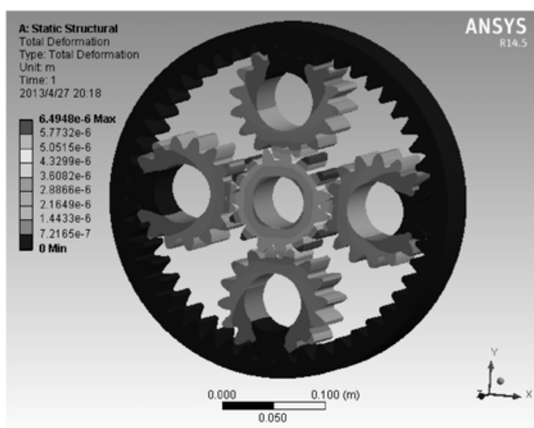


图 24-13　行星传动机构的变形云图

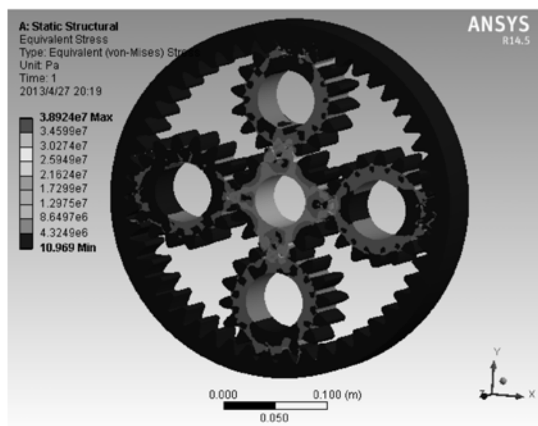


图 24-14　行星传动机构的等效应力云图

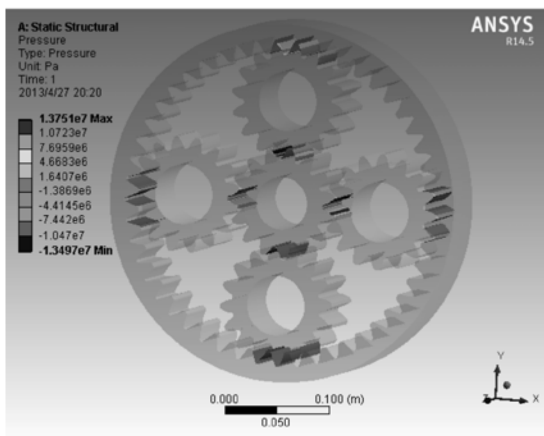


图 24-15　行星传动机构的接触压力云图

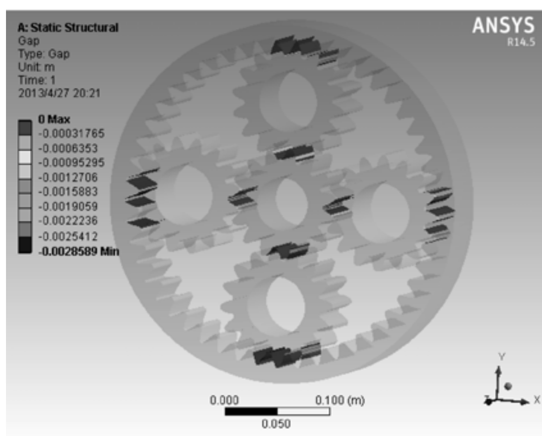


图 24-16　行星传动机构的接触间隙云图

第 25 例　锥齿轮工作升温的瞬态热应力分析



25.1　实例覆盖的知识点

读者通过学习该实例可以掌握如下 Workbench 的知识点。

1）使用 Workbench 进行瞬态热应力分析的基本步骤。

2）建立热-结构分析系统的方法。

3）设置参考温度的方法。

4）瞬态热分析的基本步骤。

5）定义随时间变化温度的方法。

6）将瞬态热分析的温度场导入结构场的方法。

25.2　问题的描述

25.2.1　几何模型

图 25-1 给出了锥齿轮的三维模型，该锥齿轮在工作中会和其他齿轮啮合传动从而会在齿轮啮合处产生热量。

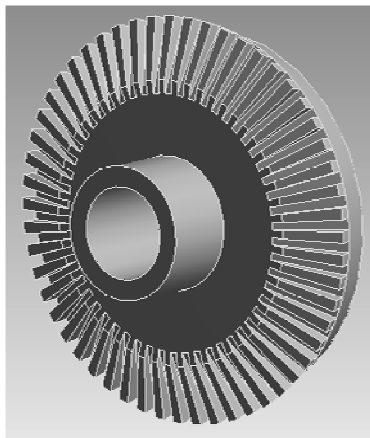


图 25-1　锥齿轮的三维模型

25.2.2　材料参数

该锥齿轮的弹性模量为 2.12E11Pa，泊松比为 0.3，密度为 7600kg/m，热膨胀系数为

2.2E-5，参考温度为 20。

25.2.3 边界条件和载荷

1．热边界条件及载荷

在锥齿轮啮合面施加温度，该温度随时间的变化如表 25−1 所示；在锥齿轮的其他表面施加与空气发生对流换热边界，其中环境温度为 20℃，对流换热系数为 20W/（m^2 • $℃^{-1}$），整个模型的初始温度为 20℃。

表 25−1　锥齿轮啮合面温度与时间的关系

时间	1	3	5	10	20	30	35	40
温度	22	45	55	100	105	120	121	104

2．结构边界条件及载荷

使用圆柱支撑约束锥齿轮的内孔。

25.3　GUI 操作

25.3.1 创建瞬态热应力分析系统

启动 Workbench，双击 Workbench 中“Toolbox”的“Transient Thermal”，则在“Project Schembc”中出现瞬态热分析系统，右击瞬态热分析中的“Solution”，选择 Transfer Data To New→Transient Structural，通过以上操作实现将瞬态热分析结果传递到瞬态动力学分析，从而搭建了瞬态热应力分析系统，最终分析系统如图 25−2 所示。

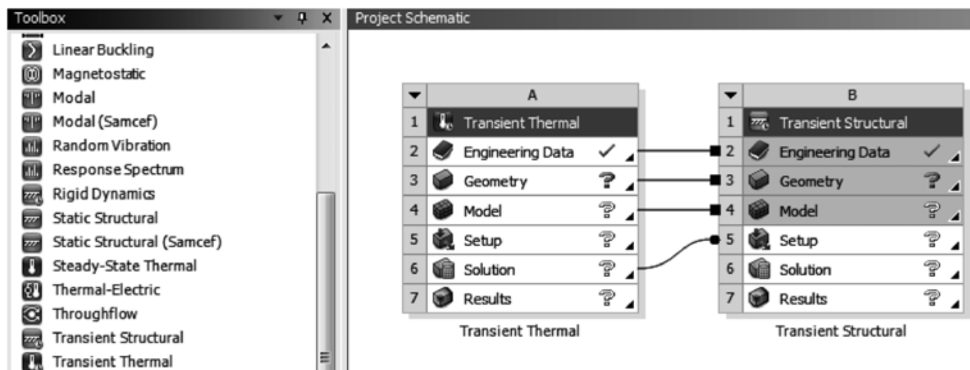


图 25−2　“瞬态热应力分析”系统

25.3.2 定义材料数据

单击瞬态热分析系统中的“Engineering Data”子模块，选择“Structural Steel”上的结构钢选项，弹出如图 25−3 所示的“结构钢材料”数据表，重新输入密度为“7600”，热膨胀系数为“2.2E−5”，参考温度为“20”，杨氏模量设置为“2.12E11”，泊松比为“0.31”，然后单击“Update Project”，最后单击“Return to Project”按钮。

Properties of Outline Row 3: Structural Steel

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Density	7600	kg m^-3		
3	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion				
4	Coefficient of Thermal Expansion	2.2E-05	C^-1		
5	Reference Temperature	20	C		
6	Isotropic Elasticity				
7	Derive from	Young's ...			
8	Young's Modulus	2.12E+11	Pa		
9	Poisson's Ratio	0.31			
10	Bulk Modulus	1.8596E+11	Pa		
11	Shear Modulus	8.0916E+10	Pa		
12	Alternating Stress Mean Stress	Tabular			
13	Interpolation	Log-Log			
14	Scale	1			
15	Offset	0	Pa		

图 25-3 “结构钢材料”数据表

25.3.3 建立几何模型

如图 25-4 所示，右击瞬态热分析系统中的几何体选项，选择 Import Geometry→Browse，打开工作目录文件夹，选择锥齿轮模型文件，单击“OK”按钮。

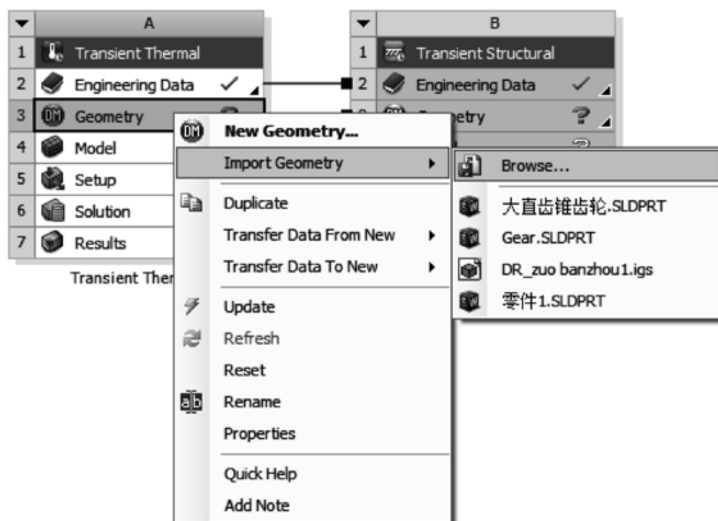


图 25-4 导入模型

25.3.4 创建有限元模型

选择瞬态热分析系统中的“Modal”选项，进入瞬态热应力分析系统，图 25-5 给出了“瞬态热应力分析”流程图，由图可知瞬态热应力分析由瞬态热分析和瞬态动力学分析组

成，在瞬态动力学之前必须要进行瞬态热分析，通过获得瞬态热分析中的温度场来进行后面的瞬态动力学分析。

1．为锥齿轮赋予材料

单击 Model→Geometry→锥齿轮，则弹出如图 25-6 所示的“锥齿轮细节”设置面板，用户一般只需设置该面板的两个子选项，即“Definition”和“Material”选项。在“Definition”选项中，用户可以设置模型的“Stiffness Behavior”“Coordinate System”和“Reference Temperature”，在“Material”选项中可以为模型指定“Assignment”，本实例选用材料为“Structural Steel”，施加参考温度方向为“By Body”，参考温度为“20”。



图 25-5 “瞬态热应力分析”流程图

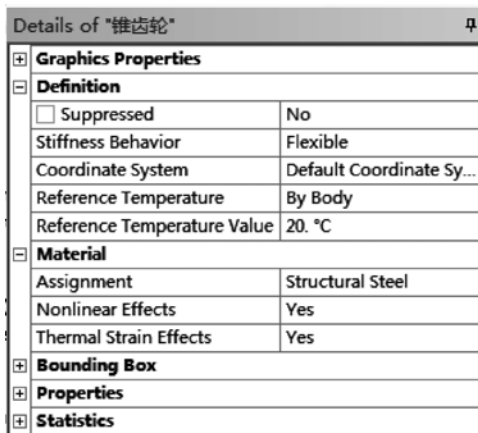


图 25-6 “振动平台细节”设置面板

2．网格划分

单击“Mesh”，弹出如图 25-7 所示的“网格划分细节”设置面板，设置“Relevance Center”为“Fine”，其他保持默认设置，然后右击“Mesh”，选择“Generate Mesh”。

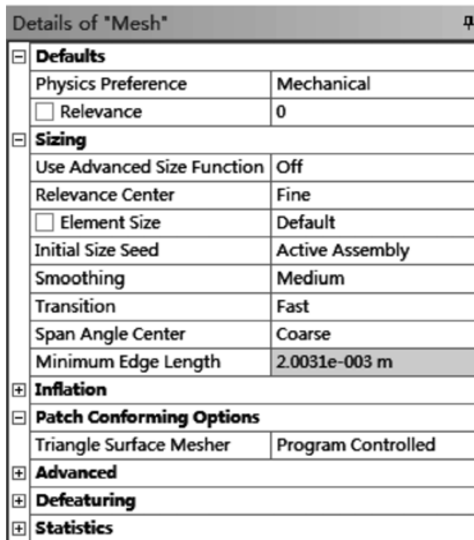


图 25-7 “网格划分细节”设置面板

25.3.5 瞬态热分析

1．设置初始温度

单击“Transient Thermal”下方的“Initial Temperature”，则在细节窗口出现如图25-8所示的“初始温度细节”设置面板，输入初始温度值为“20”。

2．瞬态热分析设置

单击“Transient Thermal”下方的“Analysis Settings”，则在细节窗口出现如图25-9所示的“瞬态热分析细节”设置面板，输入计算结束时间为“40”，关闭自动时间步，每一个时间步为“2s”。

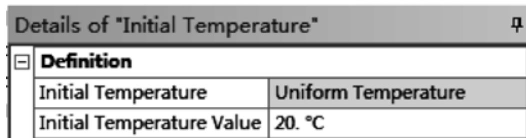


图25-8 “初始温度细节”设置面板

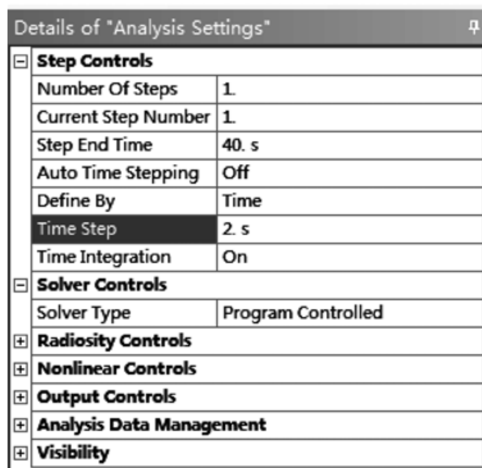
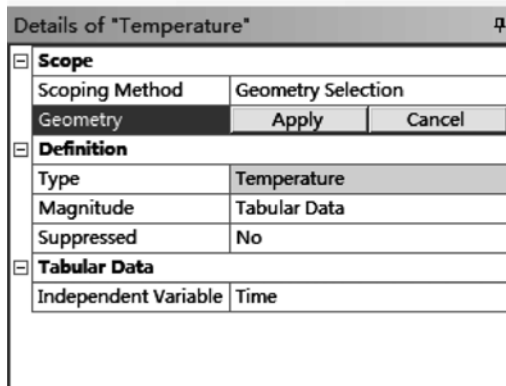


图25-9 “瞬态热分析细节”设置面板

3．定义啮合面的温度

右击“Transient Thermal”，选择Insert→Temperature，则在细节窗口出现如图25-10所示的“温度细节”设置面板，选择如图25-10所示的“温度细节”设置面板，单击“Apply”按钮，设置温度的加载方式为“Tabular Data”，然后用户按照图25-11所示的“温度与时间的关系”列表输入。



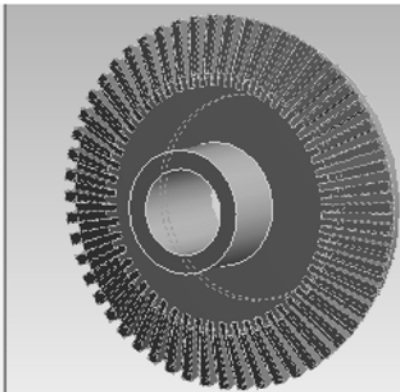
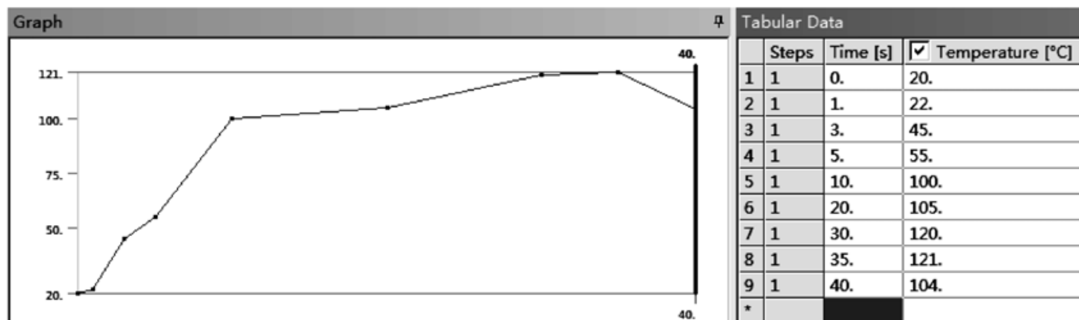


图25-10 “温度细节”设置面板



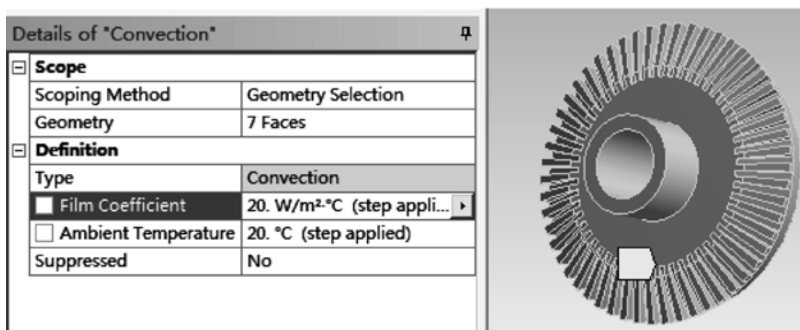
Tabular Data

	Steps	Time [s]	Temperature [°C]
1	1	0.	20.
2	1	1.	22.
3	1	3.	45.
4	1	5.	55.
5	1	10.	100.
6	1	20.	105.
7	1	30.	120.
8	1	35.	121.
9	1	40.	104.
*			

图 25-11 “温度与时间的关系”列表

4．定义锥齿轮表面的对流换热

右击“Transient Thermal”，选择 Insert→Convection，则在细节窗口出现如图 25-12 所示的“对流换热细节”设置面板，选择齿轮其他表面单击“Apply”按钮，“Film Coefficient”设为“20”，“Ambient Temperature”设为“20”。



Details of "Convection"

Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	7 Faces
Definition	
Type	Convection
Film Coefficient	20. W/m²·°C (step appli...
Ambient Temperature	20. °C (step applied)
Suppressed	No

图 25-12 “对流换热细节”设置面板

5．求解

选择 Transient Thermal→Solution，右击“Solution”，选择“Solve”。

6．观察结果

图 25-13 给出了锥齿轮的最高温度与时间的关系曲线，图 25-14 给出了锥齿轮的最低温度与时间的关系曲线，图 22-15～图 22-18 分别给出了锥齿轮不同时刻的温度云图。

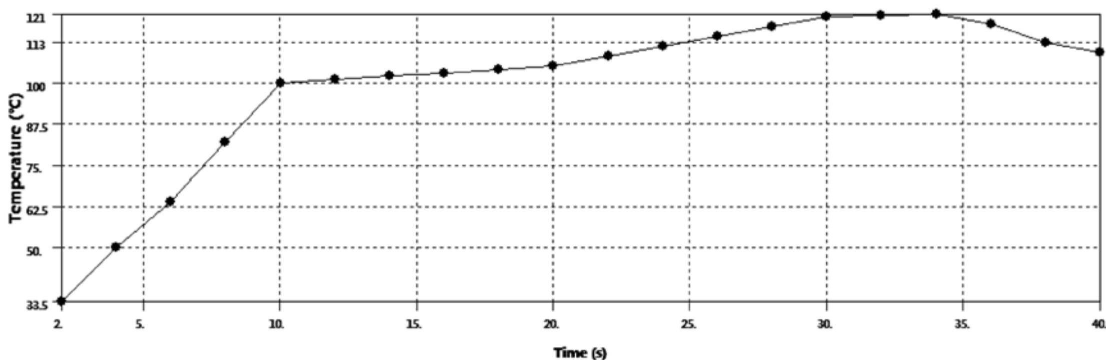


图 25-13 锥齿轮的最高温度与时间的关系曲线

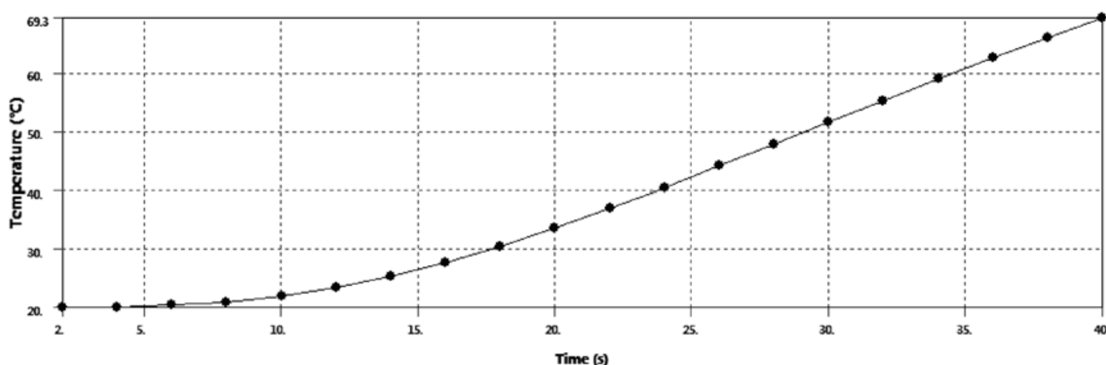


图 25-14　锥齿轮的最小温度与时间的关系曲线

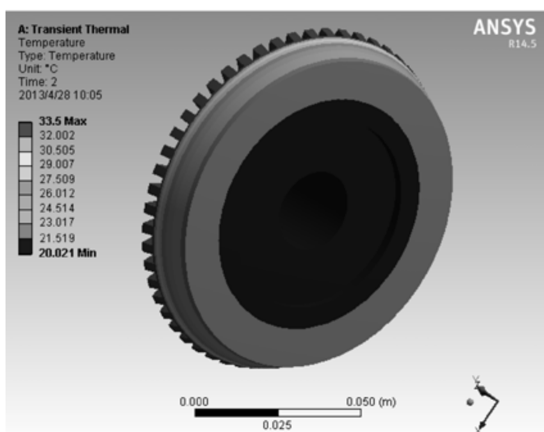


图 25-15　2s 时刻的锥齿轮的温度云图

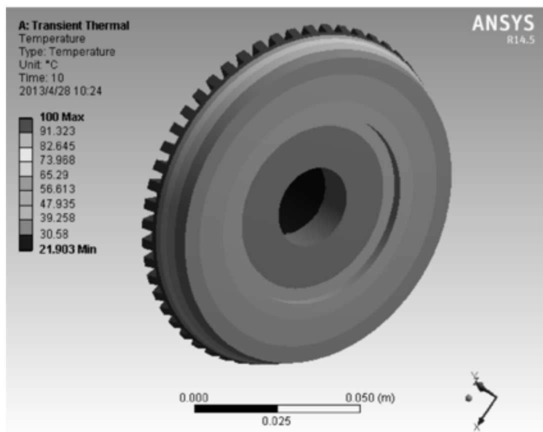


图 25-16　10s 时刻的锥齿轮的温度云图

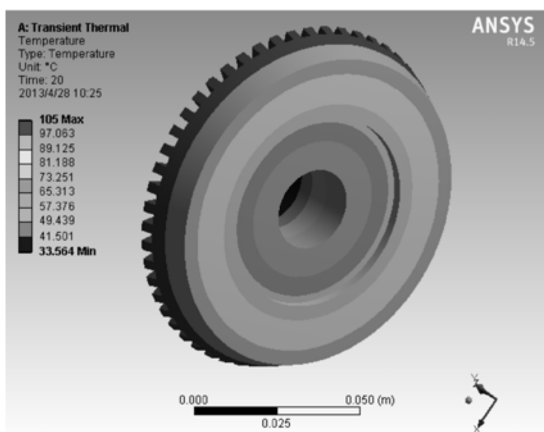


图 25-17　20s 时刻的锥齿轮的温度云图

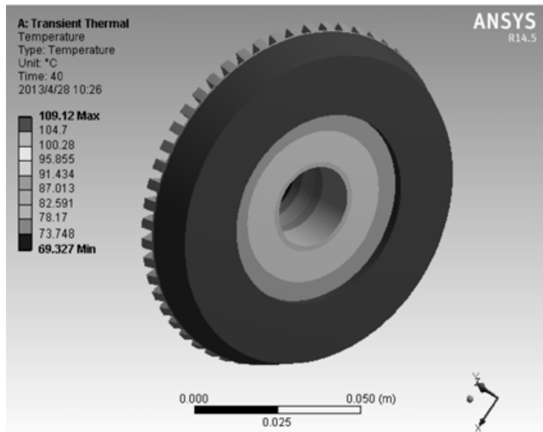
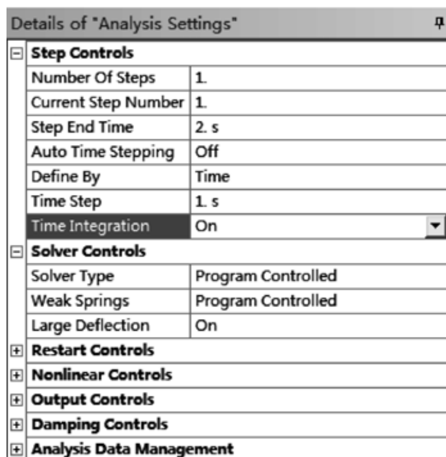


图 25-18　40s 时刻的锥齿轮的温度云图

25.3.6 瞬态动力学分析

1．瞬态动力学基本设置

单击“Transient”下方的“Analysis Settings”，则在细节窗口出现如图 25-19 所示的“瞬态动力学细节”设置面板，“Number of Steps”设为“1”，“Current Step Number”设为“1”，“Step End Time”设为“4”，“Auto Time Stepping”设为“Off”，“Define By”设为“Time”，“Time Step”设为“1”，其他设置保持默认；将“Number of Steps”和“Current Step Number”设为“2”，“Step End Time”设为“4”，“Time Step”设为“1”，其他设置保持默认；将“Number of Steps”和“Current Step Number”设为“3”，“Step End Time”设为“6”，“Time Step”设为“1”，其他设置保持默认；将“Number of Steps”和“Current Step Number”设为“4”，“Step End Time”设为“8”，“Time Step”设为“1”，其他设置保持默认；将“Number of Steps”和“Current Step Number”设为“5”，“Step End Time”设为“10”，“Time Step”设为“1”，其他设置保持默认；将“Number of Steps”和“Current Step Number”设为“6”，“Step End Time”设为“12”，“Time Step”设为“1”，其他设置保持默认；将“Number of Steps”和“Current Step Number”设为“7”，“Step End Time”设为“14”，“Time Step”设为“1”，其他设置保持默认；将“Number of Steps”和“Current Step Number”设为“8”，“Step End Time”设为“16”，“Time Step”设为“1”，其他设置保持默认；将“Number of Steps”和“Current Step Number”设为“9”，“Step End Time”设为“18”，“Time Step”设为“1”，其他设置保持默认；将“Number of Steps”和“Current Step Number”设为“10”，“Step End Time”设为“20”，“Time Step”设为“1”，其他设置保持默认；将“Number of Steps”和“Current Step Number”设为“11”，“Step End Time”设为“22”，“Time Step”设为“1”，其他设置保持默认；将“Number of Steps”和“Current Step Number”设为“12”，“Step End Time”设为“6”，“Time Step”设为“24”，其他设置保持默认；将“Number of Steps”和“Current Step Number”设为“13”，“Step End Time”设为“26”，“Time Step”设为“1”，其他设置保持默认；将“Number of Steps”和“Current Step Number”设为“14”，“Step End Time”设为“28”，“Time Step”设为“1”，其他设置保持默认；将“Number of Steps”和“Current Step Number”设为“15”，“Step End Time”设为“30”，“Time Step”设为“1”，其他设置保持默认；将“Number of Steps”和“Current Step Number”设为“16”，“Step End Time”设为“32”，“Time Step”设为“1”，其他设置保持默认；将“Number of Steps”和“Current Step Number”设为“17”，“Step End Time”设为“34”，“Time Step”设为“1”，其他设置保持默认；将“Number of Steps”和“Current Step Number”设为“18”，“Step End Time”设为“36”，“Time Step”设为“1”，其他设置保持默认；将“Number of Steps”和“Current Step Number”设为“19”，“Step End Time”设为“38”，“Time Step”设为“1”，其他设置保持默认；将“Number of Steps”和“Current Step Number”设为“20”，“Step End Time”设为“40”，“Time Step”设为“1”，其他设置保持默认。

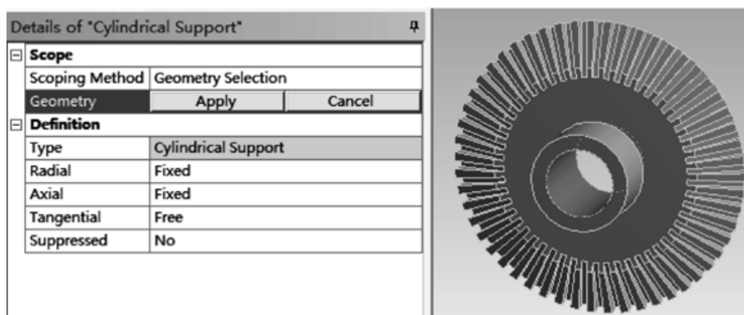

Details of "Analysis Settings"

Step Controls	
Number Of Steps	1.
Current Step Number	1.
Step End Time	2. s
Auto Time Stepping	Off
Define By	Time
Time Step	1. s
Time Integration	On
Solver Controls	
Solver Type	Program Controlled
Weak Springs	Program Controlled
Large Deflection	On
Restart Controls	
Nonlinear Controls	
Output Controls	
Damping Controls	
Analysis Data Management	

图 25-19　“瞬态动力学细节”设置面板

2．定义圆柱支撑

右击“Transient”，选择 Insert→Cylindrical Support，则在细节窗口出现如下 25-20 所示的“圆柱支撑细节”设置面板，选择锥齿轮的内孔表面单击“Apply”按钮，设置“Tangential”为“Free”。

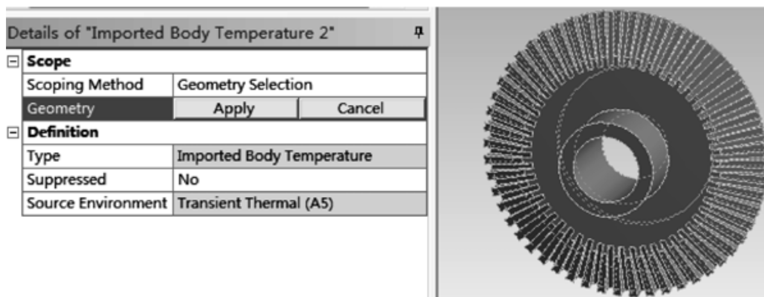

Details of "Cylindrical Support"

Scope		
Scoping Method	Geometry Selection	
Geometry	Apply	Cancel
Definition		
Type	Cylindrical Support	
Radial	Fixed	
Axial	Fixed	
Tangential	Free	
Suppressed	No	

图 25-20　“圆柱支撑细节”设置面板

3．导入瞬态热分析的温度

右击“Imported Load”，选择 Insert→Body Temperature，则细节窗口出现如图 25-21 所示的“导入温度细节”设置面板，选择整个锥齿轮体，单击“Apply”按钮，重新以上操作进行 18 次，即导入 20 个时间点的锥齿轮温度场。


Details of "Imported Body Temperature 2"

Scope		
Scoping Method	Geometry Selection	
Geometry	Apply	Cancel
Definition		
Type	Imported Body Temperature	
Suppressed	No	
Source Environment	Transient Thermal (A5)	

图 25-21　“导入温度细节”设置面板

单击“Imported Load”，则在“Data View”中出现如图 25-22 所示的“导入温度场时间”设置面板，输入源时间为“2”，分析时间为“2”，从 Imported Load2 到 Imported Load20，重复以上过程，分别输入源时间和分析时间为 4、6、8、10、12、14、16、18、20、22、24、26、28、30、32、34、36、38 和 40。

Imported Body Temperature

	Source Time (s)	Analysis Time (s)
1	2	2
*		

图 25-22 “导入温度场时间”设置面板

4．求解

选择 Transient→Solution，右击“Solution”，选择“Solve”。

5．观察结果

图 25-23～图 25-28 分别给出了不同时刻锥齿轮的热变形云图，图 25-29 和图 25-30 分别给出了锥齿轮变形量和等效应力云图与时间的关系，具体查看方法读者可参见本章的视频教程。

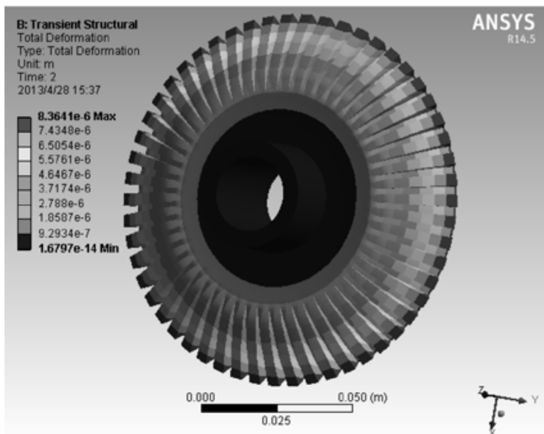


图 25-23 2s 时刻锥齿轮变形云图

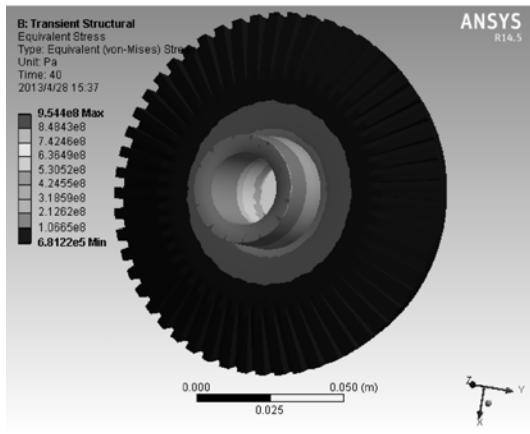


图 25-24 2s 时刻锥齿轮等效应力云图

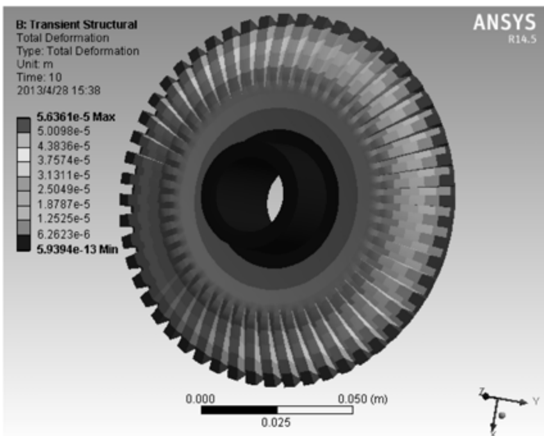


图 25-25 10s 时刻锥齿轮变形云图

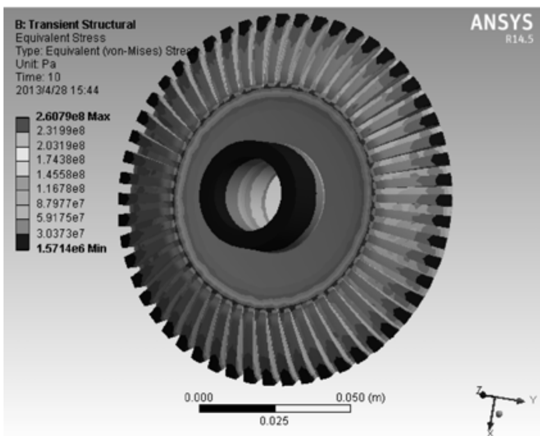


图 25-26 10s 时刻锥齿轮等效应力云图

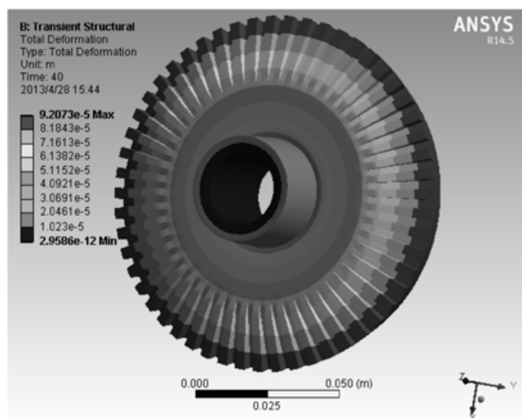


图 25-27　40s 时刻锥齿轮变形云图

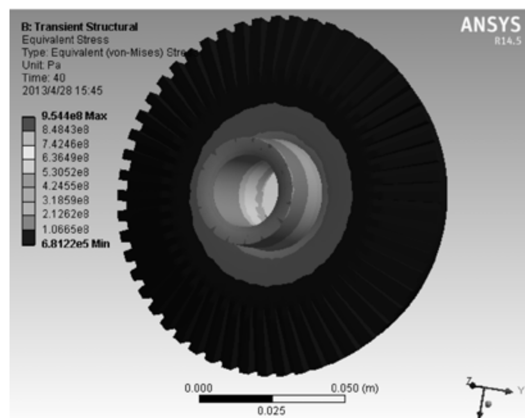


图 25-28　40s 时刻锥齿轮等效应力云图

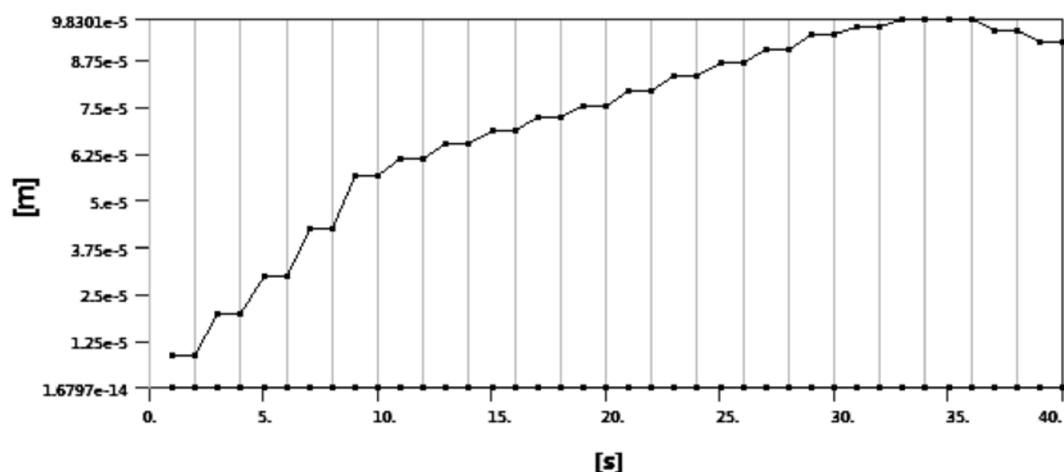


图 25-29　锥齿轮变形量与时间的关系曲线

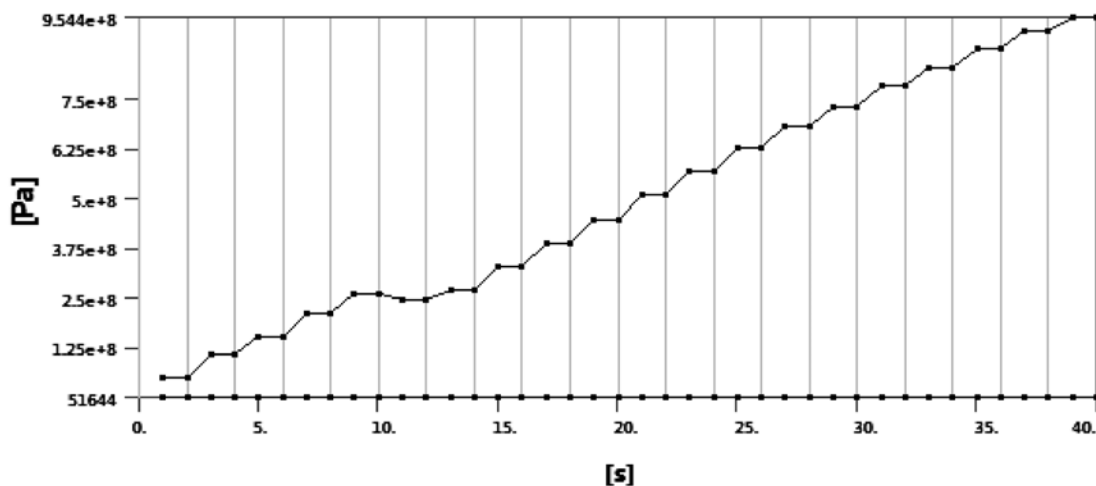


图 25-30　锥齿轮等效应力与时间的关系曲线

第 26 例　焊接接头的弹塑性分析

26.1　实例覆盖的知识点

读者通过学习该实例可以掌握如下 Workbench 的知识点。

1）非线性静力学分析的基本步骤。

2）激活双线性等向强化材料模型的方法。

3）为模型不同部分分配材料参数的方法。

4）非线性静力学求解的基本设置方法。

5）施加扭矩的方法。

26.2　问题的描述

26.2.1　几何模型

图 26-1 给出了焊接接头的三维模型，该模型由一个焊缝区、两个热影响区和两个母材区组成。

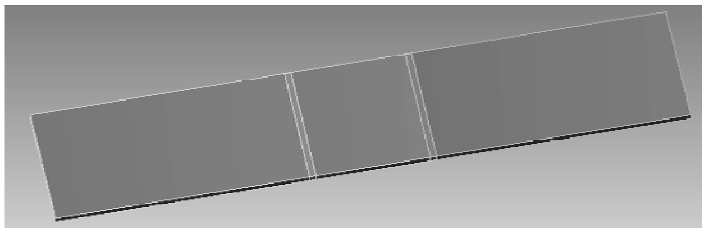


图 26-1　焊接接头的三维模型

26.2.2　材料参数

该焊接接头中母材区、热影响区和焊缝区的材料关系符合双线性等向强化模型，其中母材区的弹性模量为 2.12E11Pa，泊松比为 0.31，屈服应力为 4E8Pa，切线模量为 2E9Pa；热影响区的弹性模量为 2.13E11Pa，泊松比为 0.3，屈服应力为 3E8Pa，切线模量为 3E9Pa，焊缝区的弹性模量为 2.01E11Pa，泊松比为 0.32，屈服应力为 2.8E6，切线模量为 4E9Pa。

26.2.3　边界条件和载荷

完全固定约束焊接接头的一端侧面，在另一端侧面施加一个拉力大小为 14000N，并且

同时施加一个扭矩为 2000N・m。

26.3 GUI 操作

26.3.1 创建静力学分析系统

启动 Workbench，双击 Workbench Toolbox 的“Static Structural”，弹出如图 26-2 所示的“静力学分析系统”工程图。

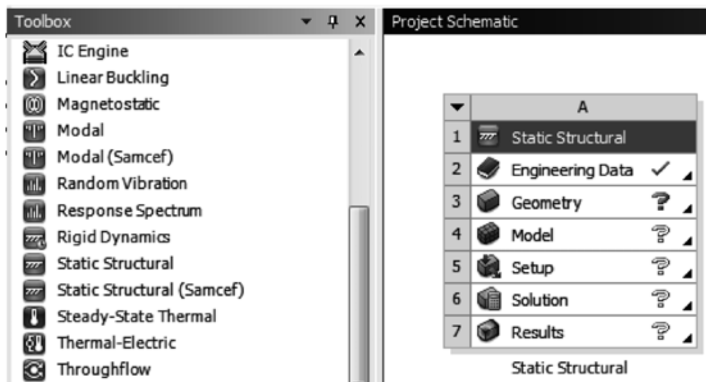


图 26-2 “静力学分析系统”工程图

26.3.2 定义材料数据

1．热影响区材料参数

单击静力学分析系统中的“Engineering Data”子模块，在“Structural Stell”下方输入“Heat affect zone”，选择 Toolbox→Linear Elastic，双击“Isotropic Elasticity”，选择 Toolbox→Plasticity，双击“Bilinear Isotropic Hardening”，则出现如图 26-3 所示的“热影响区材料参数输入”设置面板，然后输入“Young's Modulus”为“2.13E11Pa”，“Poisson's Ratio”为“0.3”，“Yield Strength”为“3E8”，“Tangent Modulus”为“3E9”。

Properties of Outline Row 4: Heat affect zone

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	⊟ Isotropic Elasticity			☐	
3	Derive from	Young's M...			
4	Young's Modulus	2.13E+11	Pa		☐
5	Poisson's Ratio	0.3			☐
6	Bulk Modulus	1.775E+11	Pa		☐
7	Shear Modulus	8.1923E+10	Pa		☐
8	⊟ Bilinear Isotropic Hardening			☐	
9	Yield Strength	3E+08	Pa		☐
10	Tangent Modulus	3E+09	Pa		☐

图 26-3 “热影响区材料参数输入”设置面板

2．母材区材料参数

在“Heat affect zone”下方输入“Base metal”，选择 Toolbox→Linear Elastic，双击“Isotropic Elasticity”，选择 Toolbox→Plasticity，双击“Bilinear Isotropic Hardening”，则出现如图 26-4 所示的“母材区材料参数输入”设置面板，然后输入“Young's Modulus”为“2.12E11Pa”，“Poisson's Ratio”为“0.31”，“Yield Strength”为“4E8”，“Tangent Modulus”为“2E9”。

Properties of Outline Row 5: Base metal

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	⊟ Isotropic Elasticity			☐	
3	Derive from	Young's Modulu...			
4	Young's Modulus	2.12E+11	Pa		☐
5	Poisson's Ratio	0.31			☐
6	Bulk Modulus	1.8596E+11	Pa		☐
7	Shear Modulus	8.0916E+10	Pa		☐
8	⊟ Bilinear Isotropic Hardening			☐	
9	Yield Strength	4E+08	Pa		☐
10	Tangent Modulus	2E+09	Pa		☐

图 26-4 “母材区材料参数输入”设置面板

3．焊缝区材料参数

在“Base metal”下方输入“Weld zone”，选择 Toolbox→Linear Elastic，双击“Isotropic Elasticity”，选择 Toolbox→Plasticity，双击“Bilinear Isotropic Hardening”，则出现如图 26-5 所示的“焊缝区材料参数输入”设置面板，然后输入“Young's Modulus”为“2.01E11Pa”，“Poisson's Ratio”为“0.32”，“Yield Strength”为“2.8E8”，“Tangent Modulus”为“4E9”。

Properties of Outline Row 6: Weld zone

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	⊟ Isotropic Elasticity			☐	
3	Derive from	Young's M...			
4	Young's Modulus	2.01E+11	Pa		☐
5	Poisson's Ratio	0.32			☐
6	Bulk Modulus	1.8611E+11	Pa		☐
7	Shear Modulus	7.6136E+10	Pa		☐
8	⊟ Bilinear Isotropic Hardening			☐	
9	Yield Strength	2.8E+08	Pa		☐
10	Tangent Modulus	4E+09	Pa		☐

图 26-5 “焊缝区材料参数输入”设置面板

26.3.3 建立几何模型

如图 26-6 所示，右击模态分析系统中的几何体选项，选择 Import Gemoetry→Browse，打开工作目录文件夹，选择焊接接头模型文件，单击“OK”按钮。

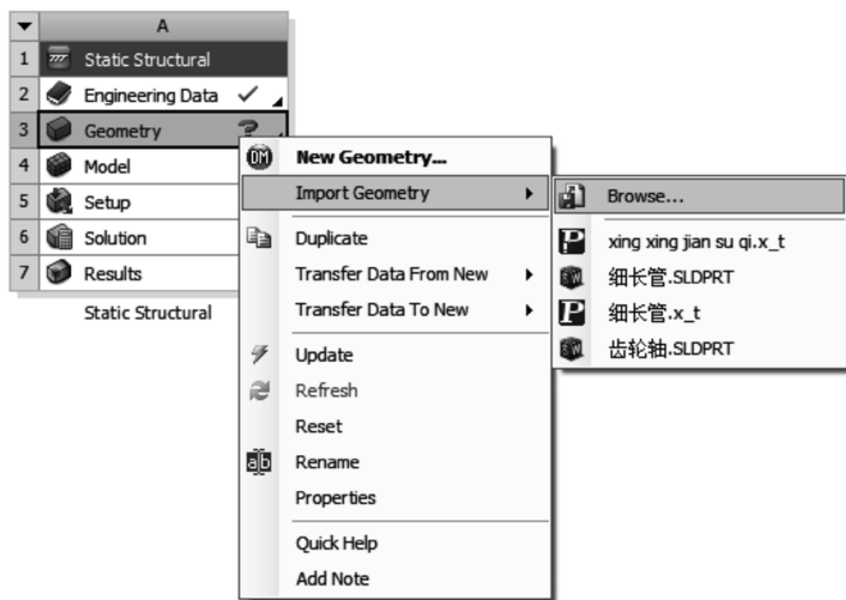


图 26-6 导入模型

26.3.4 创建有限元模型

选择静力学分析系统中的“Modal”选项，进入静力学分析系统，图 26-7 给出了“静力学分析系统”流程图。

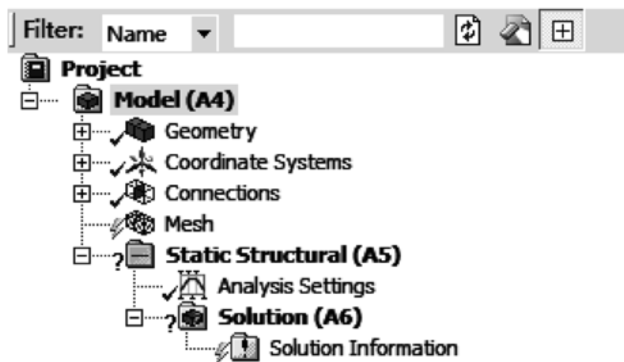


图 26-7 “静力学分析系统”流程图

1. 为母材区赋予材料

单击 Model→Geometry→母材区，则弹出如图 26-8 所示的“母材区材料细节”设置面板，用户一般只需设置该面板的两个子选项，即“Definition”和“Material”选项。在“Definition”选项中，用户可以设置模型的“Stiffness Behavior”“Coordinate System”和“Reference Temperature”，在“Material”选项中可以为模型指定“Assignment”，本实例选用材料为“Base metal”。

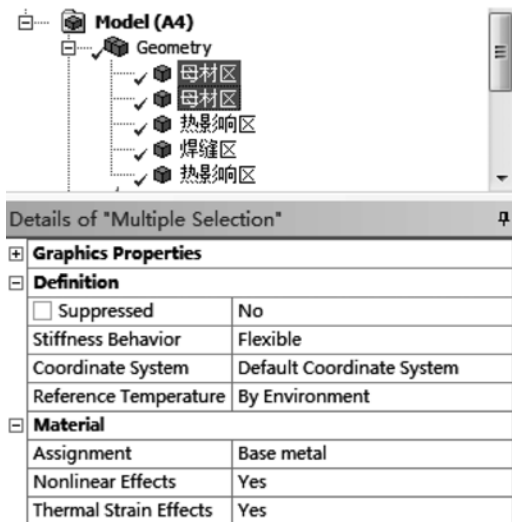


图 26-8 “母材区材料细节”设置面板

2．为热影响区赋予材料

单击 Model→Geometry→热影响区，则弹出如图 26-9 所示的“热影响区材料细节”设置面板，用户一般只需设置该面板的两个子选项，即“Definition”和“Material”选项。在“Definition”选项中，用户可以设置模型的“Stiffness Behavior”“Coordinate System”和“Reference Temperature”，在“Material”选项中可以为模型指定“Assignment”，本实例选用材料为“Heat affect zone”。

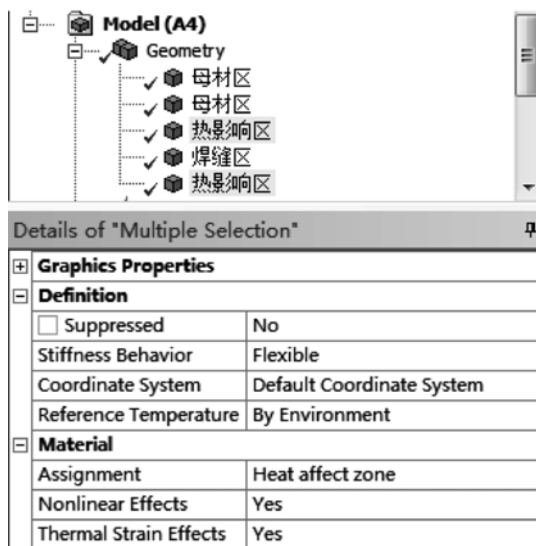


图 26-9 “热影响区材料细节”设置面板

3．为焊缝区区赋予材料

单击 Model→Geometry→热影响区，则弹出如图 26-10 所示的“焊缝区材料细节”设置面板，用户一般只需设置该面板的两个子选项，即“Definition”和“Material”选项。在

“Definition”选项中，用户可以设置模型的“Stiffness Behavior”“Coordinate System”和“Reference Temperature”，在“Material”选项中可以为模型指定“Assignment”，本实例选用材料为“Heat affect zone”。

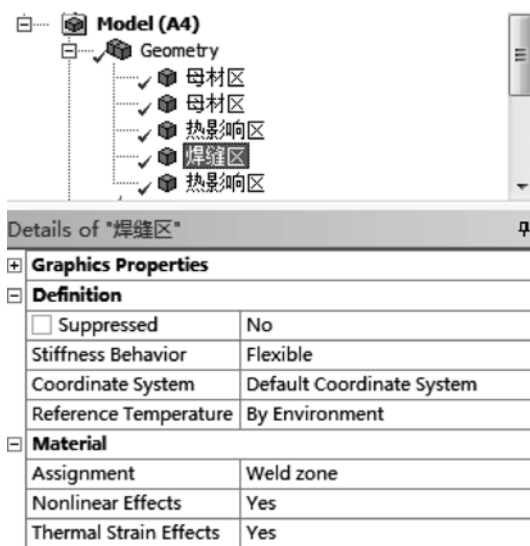


图 26-10 “焊缝区材料细节”设置面板

4．网格划分

单击“Mesh”，弹出如图 26-11 所示的“网格划分细节”设置面板，设置“Relevance Center”为“Fine”，其他保持默认设置，然后右击“Mesh”，选择“Generate Mesh”。

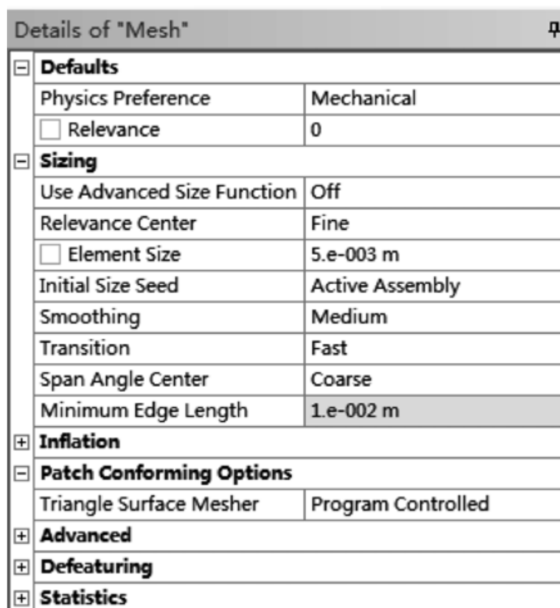


图 26-11 “网格划分细节”设置面板

26.3.5 静力学分析

1．静力学分析设置

单击“Static Structural”下方的“Analysis Settings”，则会出现如图 26-12 所示的“静力学求解分析细节”设置面板，设置“Substeps”的初始子步为“100”，最小子步为“50”，最大子步为“200”，设置“Large Deflection”为“On”，表明激活了大变形。

Details of "Analysis Settings"

Step Controls	
Number Of Steps	1.
Current Step Number	1.
Step End Time	1. s
Auto Time Stepping	On
Define By	Substeps
Initial Substeps	100.
Minimum Substeps	50.
Maximum Substeps	200.
Solver Controls	
Solver Type	Program Controlled
Weak Springs	Program Controlled
Large Deflection	On
Inertia Relief	Off
Restart Controls	
Nonlinear Controls	
Output Controls	
Analysis Data Management	
Visibility	

图 26-12 “静力学分析细节”设置面板

2．施加固定约束

右击“Static Structural”，选择 Insert→Fixed Support，则在细节窗口出现如图 26-13 所示的“固定约束细节”设置面板，选择焊接接头的一个端面，单击“Apply”按钮。

Details of "Fixed Support"

Scope		
Scoping Method	Geometry Selection	
Geometry	Apply	Cancel
Definition		
Type	Fixed Support	
Suppressed	No	

图 26-13 “固定约束细节”设置面板

3．施加力

右击“Static Structural”，选择 Insert→Force，则在细节窗口出现如图 26-14 所示的“力

细节设置”面板，选择焊接接头的另一个端面，单击“Apply”按钮，设置施加力的方式为“Components”，输入“Z Component”为“-15000”。

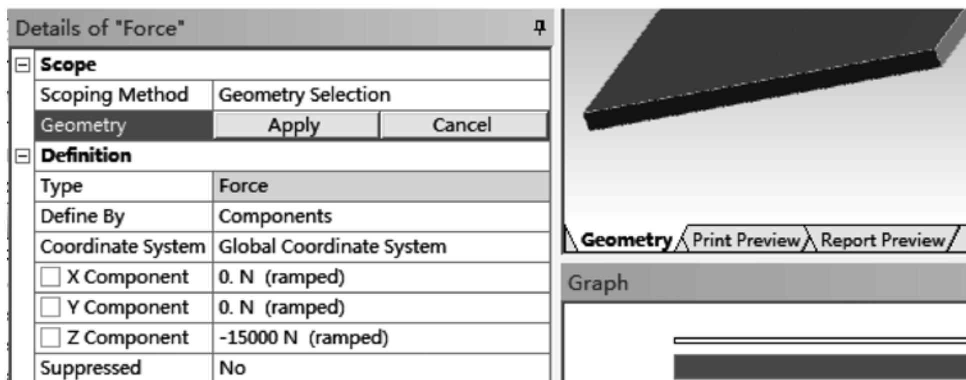


图 26-14 “力细节”设置面板

4．施加扭矩

右击“Static Structural”，选择 Insert→Moment，则在细节窗口出现如图 26-15 所示的“力矩细节”设置面板，选择焊接接头的另一个端面，单击“Apply”按钮，设置施加力矩的方式为“Components”，输入“Z Component”为“3000”。

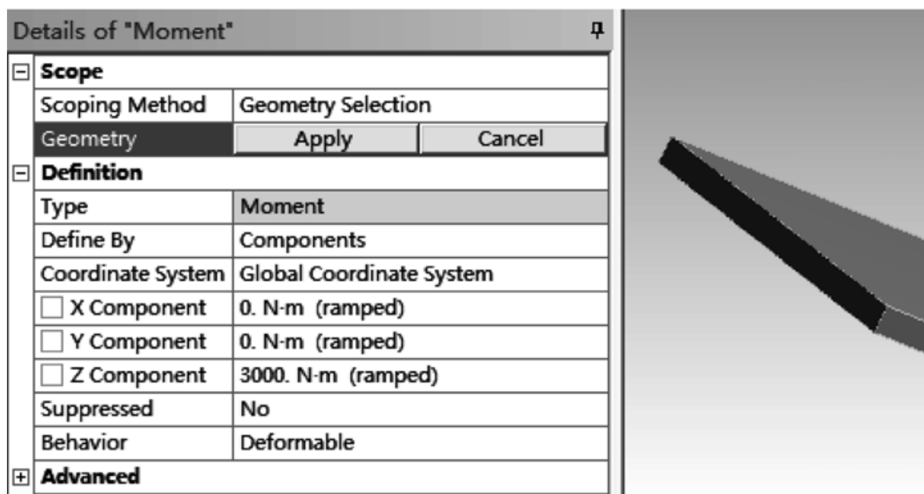


图 26-15 “力矩细节”设置面板

5．求解

选择 Static Structural→Solution，右击“Solution”，选择“Solve”。

6．观察结果

图 26-16～图 26-21 分别给出了焊接接头不同加载比例作用下的变形云图和等效应力云图，图 26-22～图 26-24 分别给出了焊接接头的加载比例与最大变形，最大等效塑性应变和最大等效应力的关系曲线，具体查看方法读者可以参见本章的视频教程。



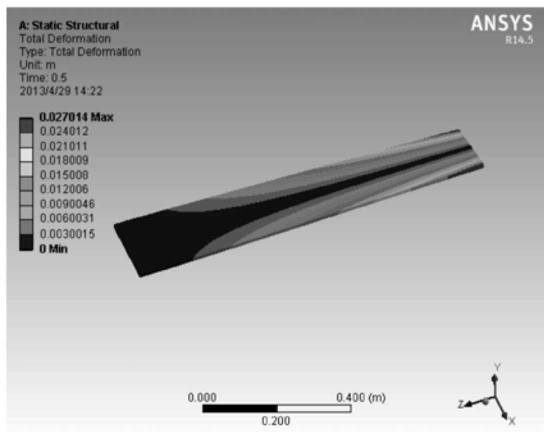


图 26-16　加载 50%时的焊接接头变形云图

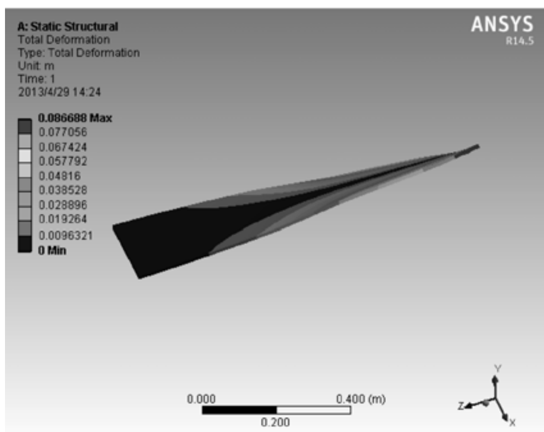


图 26-17　加载 100%时的焊接接头变形云图

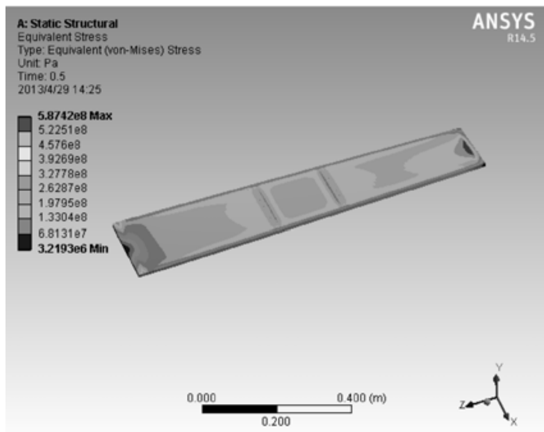


图 26-18　加载 50%时的焊接接头等效应力云图

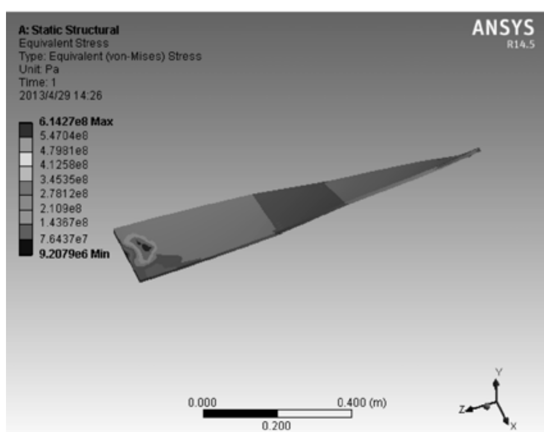


图 26-19　加载 100%时的焊接接头等效应力云图

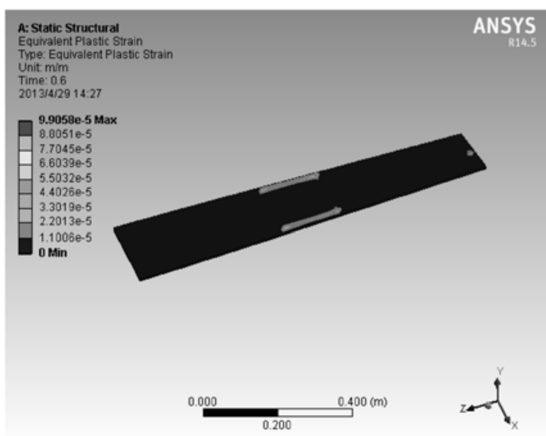


图 26-20　加载 60%时的焊接接头等效塑性应变云图

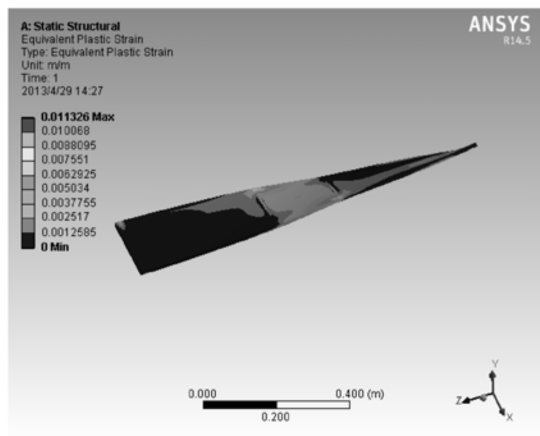


图 26-21　加载 100%时的焊接接头等效塑性应变云图

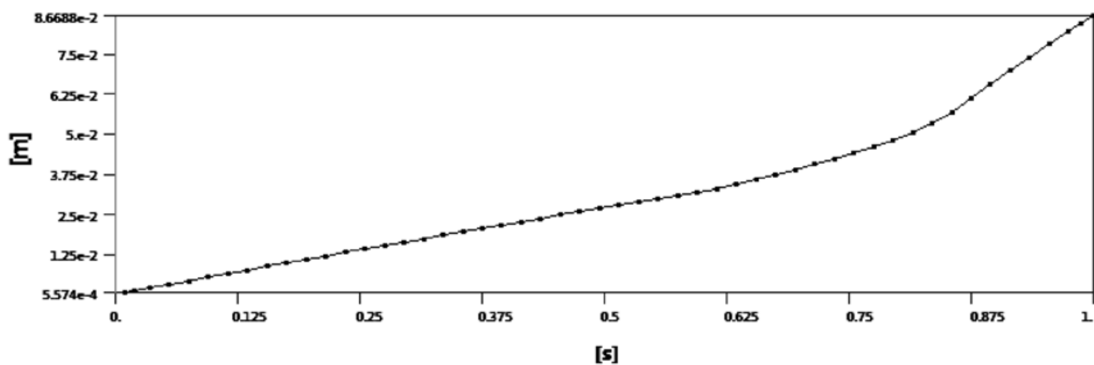


图 26-22 加载比例与焊接接头最大变形关系

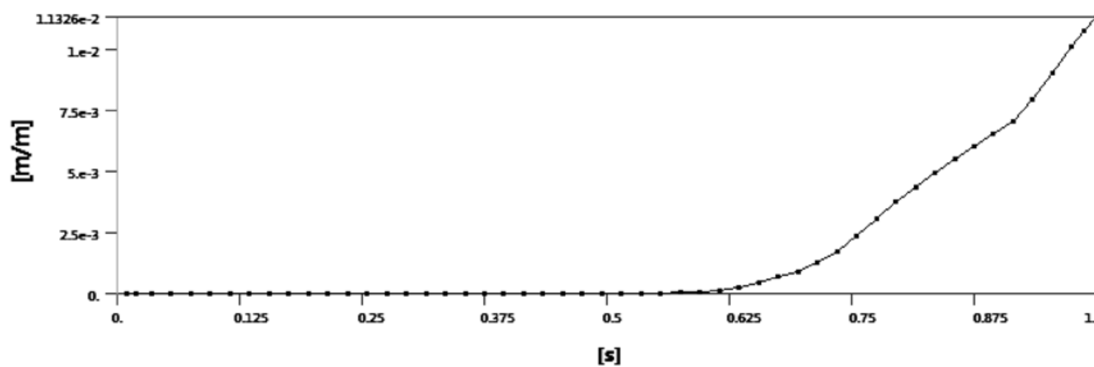


图 26-23 加载比例与焊接接头最大等效塑性应变关系

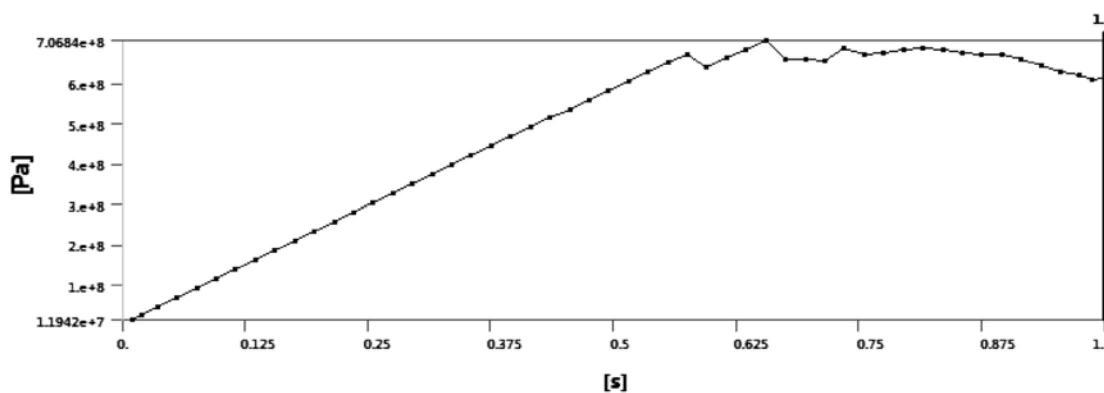


图 26-24 加载比例与焊接接头最大等效应力关系

第 27 例　行星机构的刚-柔耦合动力学分析

27.1　实例覆盖的知识点

读者通过学习该实例可以掌握如下 Workbench 的知识点。

1）结构瞬态动力学分析的基本步骤。

2）创建刚-柔接触对的方法。

3）创建运动副连接关系的方法。

4）创建摩擦接触对的方法。

5）动力学求解基本设置的方法。

6）施加转动位移的方法。

27.2　问题的描述

27.2.1　几何模型

图 27-1 给出了行星机构的三维模型，该模型由一个太阳轮、一个行星轮和一个齿圈组成。

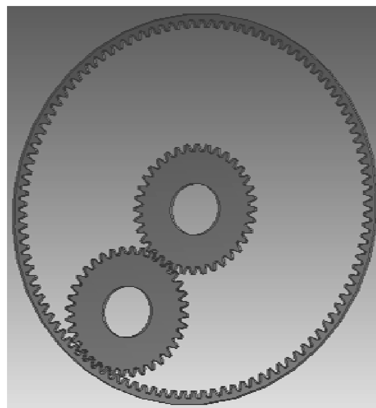


图 27-1　行星机构三维模型

27.2.2　材料参数

本实例假设行星机构的材料为钢结构，假设外部齿圈为刚体，太阳轮和行星轮为柔性体其弹性模量为 2.12E11Pa，泊松比为 0.31，密度为 7500kg/m^3。

27.2.3　边界条件和载荷

固定齿圈外表面，约束行星轮的轴向位移允许其在平面内运动，在太阳轮施加一个转动位移 180°。

27.3　GUI 操作

27.3.1　创建静力学分析系统

启动 Workbench，双击 Workbench Toolbox 的“Static Structural”，弹出如图 27-2 所示的

“瞬态动力学分析系统”工程图。

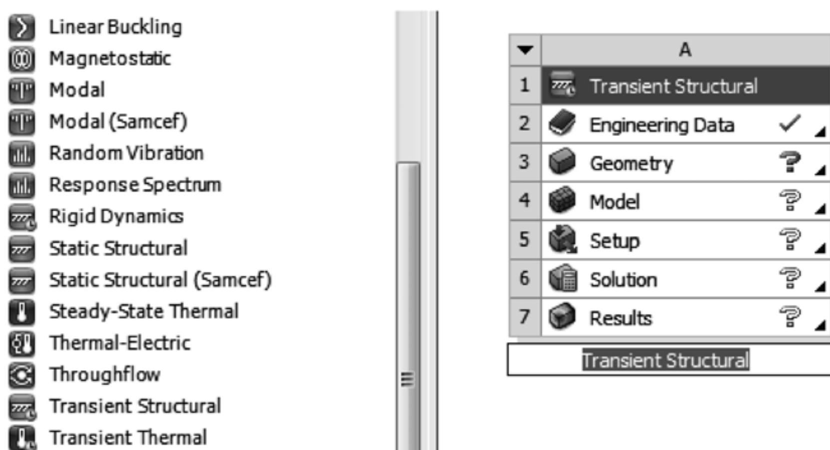
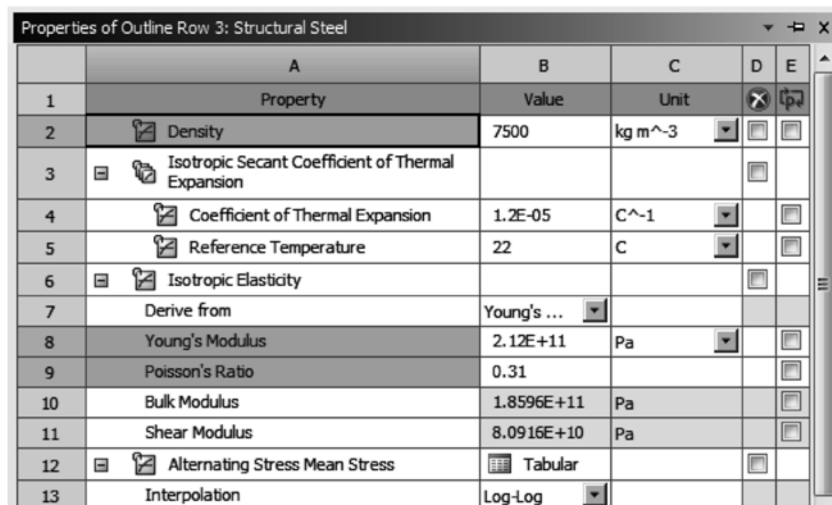


图 27-2 “瞬态动力学分析系统”工程图

27.3.2 定义材料数据

单击静力学分析系统中的“Engineering Data”子模块，单击“Structural Stell”则出现如图 27-3 所示的“行星机构材料参数输入”设置面板，然后输入密度为“7500”，“Young's Modulus”设为“2.12E11Pa”，“Poisson's Ratio”设为“0.31”，然后单击“Update Project”，最后单击“Return to Project”按钮。


Properties of Outline Row 3: Structural Steel

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Density	7500	kg m^-3		
3	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion				
4	Coefficient of Thermal Expansion	1.2E-05	C^-1		
5	Reference Temperature	22	C		
6	Isotropic Elasticity				
7	Derive from	Young's ...			
8	Young's Modulus	2.12E+11	Pa		
9	Poisson's Ratio	0.31			
10	Bulk Modulus	1.8596E+11	Pa		
11	Shear Modulus	8.0916E+10	Pa		
12	Alternating Stress Mean Stress	Tabular			
13	Interpolation	Log-Log			

图 27-3 “行星机构材料参数输入”设置面板

27.3.3 建立几何模型

如图 27-4 所示，右击模态分析系统中的几何体选项，选择 Import Gemoetry→Browse，打开工作目录文件夹，选择刚-柔行星机构模型文件，单击“OK”按钮。

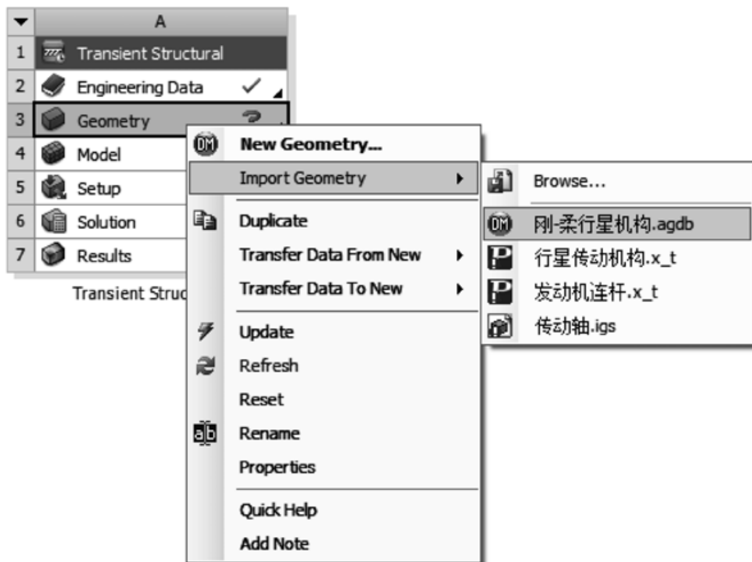


图 27-4 导入模型

27.3.4 创建有限元模型

选择瞬态动力学分析系统中的“Modal”选项，进入瞬态动力学分析系统，图 27-5 给出了“瞬态动力学分析系统”流程图。

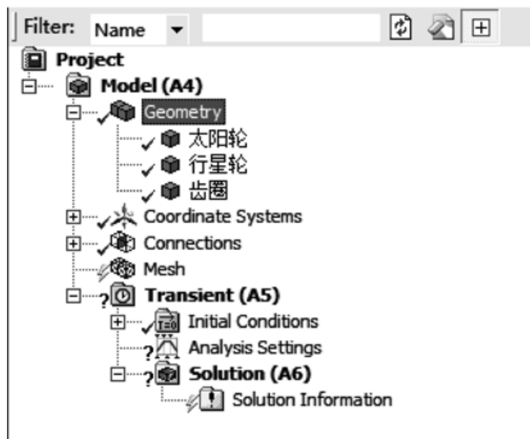


图 27-5 “瞬态动力学分析系统”流程图

1. 为太阳轮和行星轮赋予材料

单击 Model→Geometry→太阳轮加行星轮，则弹出如图 27-6 所示的“模型细节”设置面板，用户一般只需设置该面板的两个子选项，即“Definition”和“Material”选项。在“Definition”选项中，用户可以设置模型的“Stiffness Behavior”“Coordinate System”和“Reference Temperature”，在“Material”选项中可以为模型指定“Assignment”，本实例选用材料为“Structural Steel”。

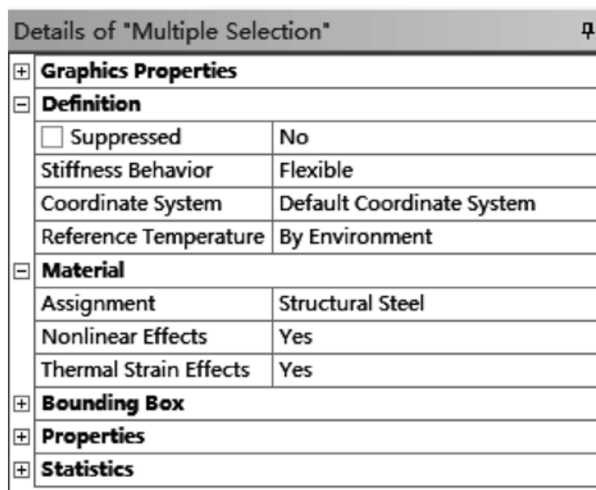


图 27-6 “模型细节”设置面板

2．为齿圈赋予材料

单击 Model→Geometry→齿圈，则弹出如图 27-7 所示的“齿圈材料细节”设置面板，用户一般只需设置该面板的两个子选项，即“Definition”和“Material”选项。在“Definition”选项中，用户可以设置模型的“Stiffness Behavior”“Coordinate System”和“Reference Temperature”，在“Material”选项中可以为模型指定“Assignment”，本实例设置齿圈的刚度行为“Rigid”。

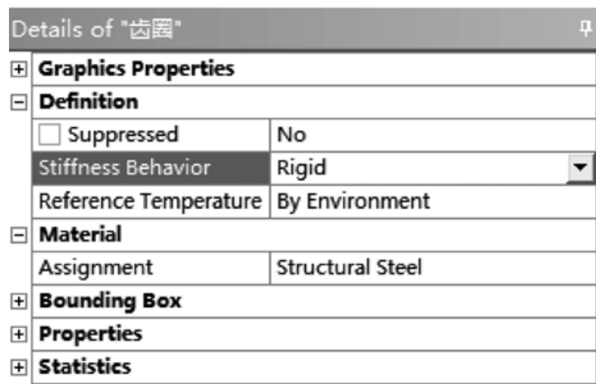


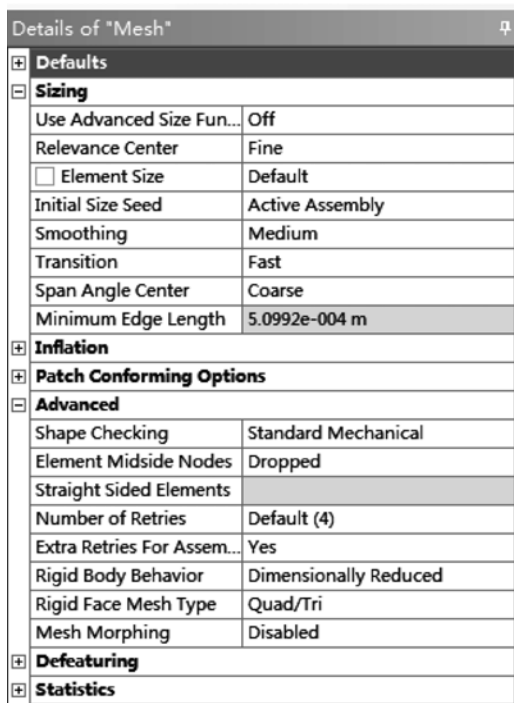
图 27-7 “齿圈材料细节”设置面板

3．网格划分

单击“Mesh”，弹出如图 27-8 所示的“网格划分细节”设置面板，设置“Relevance Center”为“Fine”，其他保持默认设置，然后右击“Mesh”，选择“Generate Mesh”。

4．创建实体组件

通过该步来创建实体组件为下一步定义行星结构之间的接触关系做准备，该步主要定义 3 个实体组件：齿圈的内齿面，命名为 C1；行星轮的外齿面，命名为 C2；太阳轮的外齿面命名为 C3。该步的操作过程用户可以参见本章的视频教程。



Details of "Mesh"

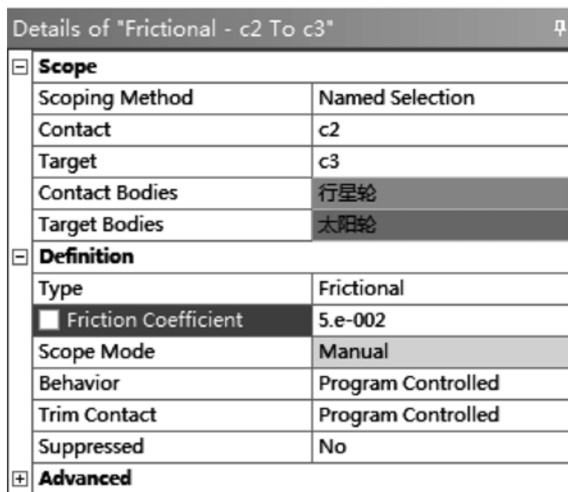
⊞ Defaults	
⊟ Sizing	
Use Advanced Size Fun...	Off
Relevance Center	Fine
☐ Element Size	Default
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	Medium
Transition	Fast
Span Angle Center	Coarse
Minimum Edge Length	5.0992e-004 m
⊞ Inflation	
⊞ Patch Conforming Options	
⊟ Advanced	
Shape Checking	Standard Mechanical
Element Midside Nodes	Dropped
Straight Sided Elements	
Number of Retries	Default (4)
Extra Retries For Assem...	Yes
Rigid Body Behavior	Dimensionally Reduced
Rigid Face Mesh Type	Quad/Tri
Mesh Morphing	Disabled
⊞ Defeaturing	
⊞ Statistics	

图 27-8 “网格划分细节”设置面板

5．定义接触

（1）定义太阳轮与行星轮的接触

单击 Model→Connections→Contacts→Contact Region，则在细节窗口出现如图 27-9 所示的“接触区域细节”设置面板，设置接触范围选择方式为“Named Selection”，选择“Contact”为“C2”，“Target”为“C3”，“Type”为“Frictional”，输入“Friction Coefficient”为“0.05”，其他设置保持默认。



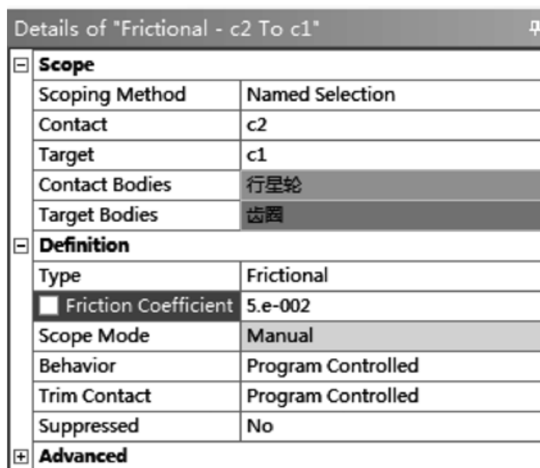
Details of "Frictional - c2 To c3"

⊟ Scope	
Scoping Method	Named Selection
Contact	c2
Target	c3
Contact Bodies	行星轮
Target Bodies	太阳轮
⊟ Definition	
Type	Frictional
☐ Friction Coefficient	5.e-002
Scope Mode	Manual
Behavior	Program Controlled
Trim Contact	Program Controlled
Suppressed	No
⊞ Advanced	

图 27-9 “接触区域细节”设置面板

（2）定义行星轮与齿圈的接触

单击 Model→Connections→Contacts→Contact Region，则在细节窗口出现如图 27-10 所示的“接触区域细节”设置面板，设置接触范围选择方式为“Named Selection”，选择“Contact”为“C2”，“Target”为“C1”，“Type”为“Frictional”，输入“Friction Coefficient”为“0.05”，其他设置保持默认。



Details of "Frictional - c2 To c1"

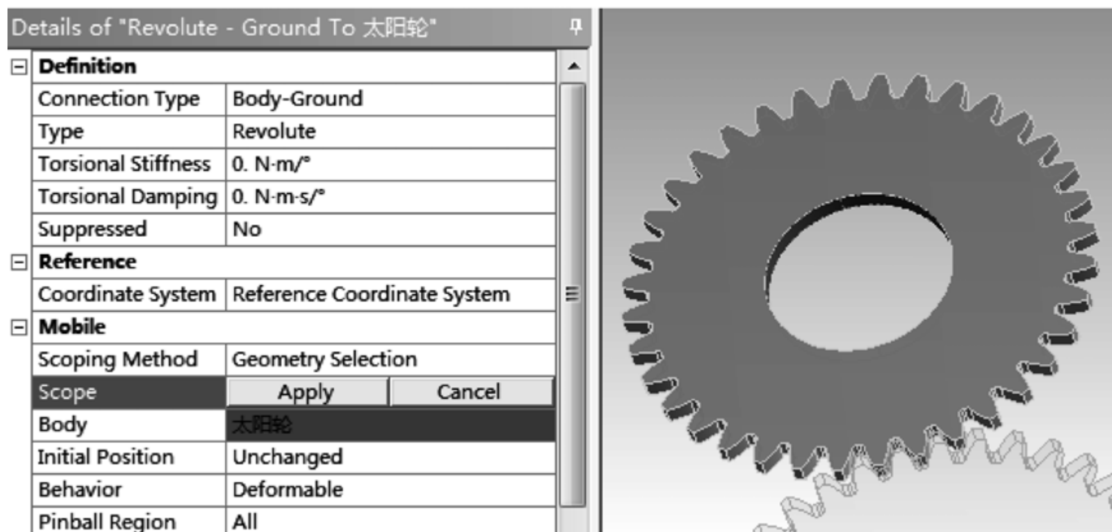
Scope	
Scoping Method	Named Selection
Contact	c2
Target	c1
Contact Bodies	行星轮
Target Bodies	齿圈
Definition	
Type	Frictional
Friction Coefficient	5.e-002
Scope Mode	Manual
Behavior	Program Controlled
Trim Contact	Program Controlled
Suppressed	No
Advanced	

图 27-10 “接触区域细节”设置面板

6．定义运动副

（1）定义太阳轮的运动副

右击“Connections”，选择 Insert→Joint，则在细节窗口出现如图 27-11 所示的“运动副细节”设置面板，设置“Connection Type”为“Body-Ground”，“Type”为“Revolute”，选择太阳轮的内孔面，单击“Apply”按钮，设置“Behavior”为“Deformable”。



Details of "Revolute - Ground To 太阳轮"

Definition	
Connection Type	Body-Ground
Type	Revolute
Torsional Stiffness	0. N·m/°
Torsional Damping	0. N·m·s/°
Suppressed	No
Reference	
Coordinate System	Reference Coordinate System
Mobile	
Scoping Method	Geometry Selection
Scope	Apply / Cancel
Body	太阳轮
Initial Position	Unchanged
Behavior	Deformable
Pinball Region	All

图 27-11 “运动副细节”设置面板

单击“Connections”，选择 Joints→Revolute-Ground To 太阳轮→Reference Coordinate System，则在细节窗口出现如图 27-12 所示的“参考坐标系细节”设置面板，设置主轴为“Y”，通过这样设置可以使刚才定义的运动副的转动方向与齿轮的转动方向相同。

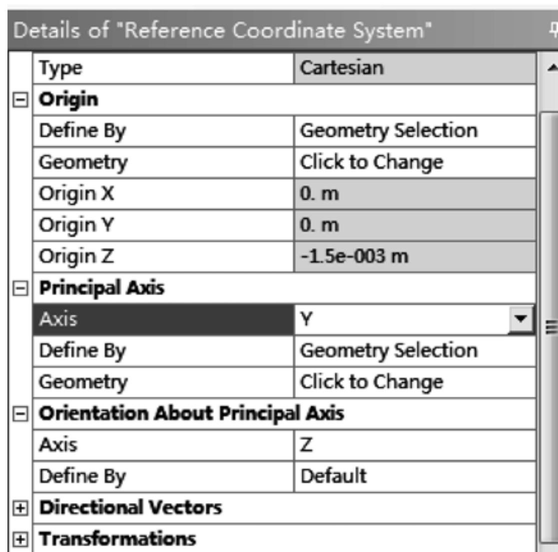


图 27-12　参考坐标系细节设置面板

（2）定义齿圈的运动副

右击“Connections”，选择 Insert→Joint，则在细节窗口出现如图 27-13 所示的“运动副细节”设置面板，设置“Connection Type”为“Body-Ground”，“Type”为“Fixed”，选择齿圈的外表面，单击“Apply”按钮。

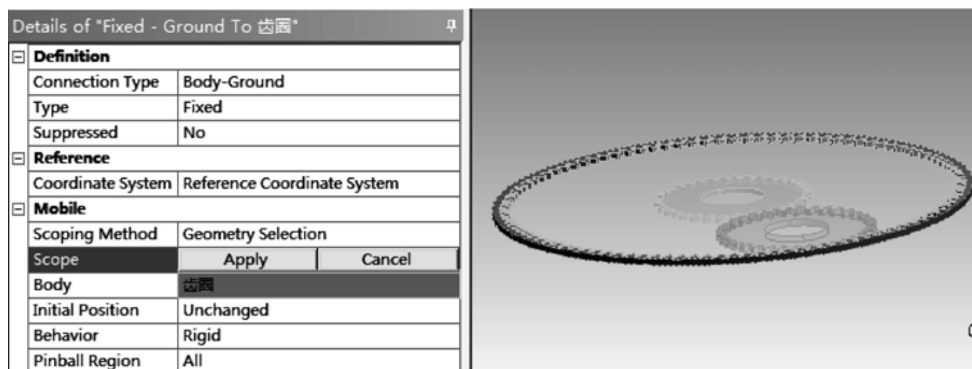


图 27-13　“运动副细节”设置面板

27.3.5 瞬态动力学分析

1．瞬态动力学分析设置

单击“Static Structural”下方的“Analysis Settings”，则会出现如图 27-14 所示的“瞬态动力学分析细节”设置面板，设置“Large Deflection”为“On”，表明激活了大变形，输入

计算结束时间为“0.1s”，定义方式为“Substeps”，初始子步为“500”，最小子步为“200”，最大子步为“800”，其他设置保持默认。

Details of "Analysis Settings"

Step Controls	
Number Of Steps	1.
Current Step Number	1.
Step End Time	0.2 s
Auto Time Stepping	On
Define By	Substeps
Initial Substeps	360.
Minimum Substeps	150.
Maximum Substeps	1000.
Time Integration	On
Solver Controls	
Solver Type	Program Controlled
Weak Springs	Program Controlled
Large Deflection	On
Restart Controls	
Nonlinear Controls	
Output Controls	
Damping Controls	
Analysis Data Management	
Visibility	

图 27-14 “瞬态动力学分析细节”设置面板

2．施加转动位移

右击“Transient”，选择 Insert→Joint Load，则在细节窗口出现如图 27-15 所示的“铰接转动细节”设置面板，选择“Joint”为“Revolute-Ground To 太阳轮”，“Type”为“Rotation”，“Magnitude”为“Tabular Data”，在面板的右侧输入 0 对应的角度为 0°，0.1s 时刻对应于 100°。

Details of "Joint - Rotation"

Scope	
Joint	Revolute - Ground To 太阳轮
Definition	
DOF	Rotation Z
Type	Rotation
Magnitude	Tabular Data
Lock at Load Step	Never
Suppressed	No

Tabular Data

	Steps	Time [s]	☑ Rotation [°]
1	1	0.	0.
2	1	0.2	180.
*			

图 27-15 “铰接转动细节”设置面板

3．定义位移约束

右击“Transient”，选择 Insert→Displacement，则在细节窗口出现如图 27-16 所示的“位移约束细节”设置面板，选择行星轮内孔面，单击“Apply”按钮，设置“Z Component”为“0”。

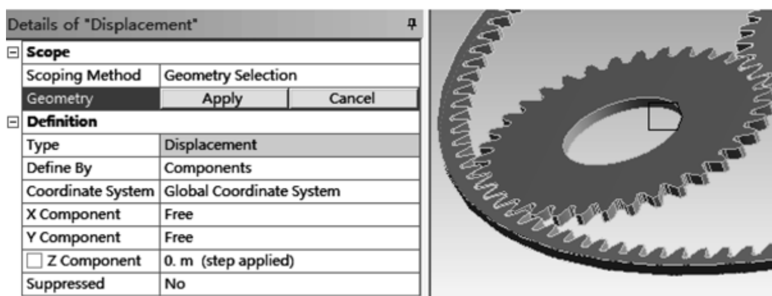


图 27-16 “位移约束细节”设置面板

4．求解

选择 Transient→Solution，右击“Solution”，选择“Solve”。

5．观察结果

图 27-17～图 27-24 分别给出了行星机构刚-柔动力学不同时刻的等效应力和接触压力云图，图 27-25 和图 27-26 分别给出了行星机构刚-柔动力学等效应力和接触压力随时间变化的关系，具体查看方法读者可以参见本章的视频教程。

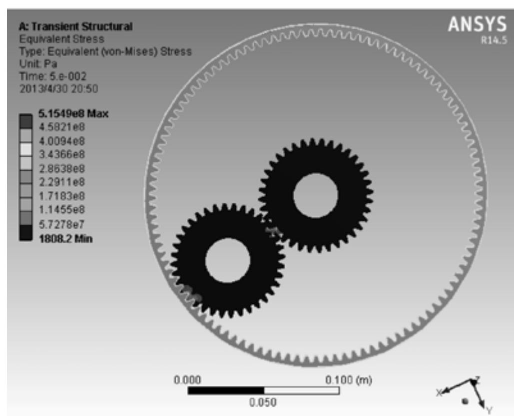


图 27-17　0.05 时刻的等效应力云图

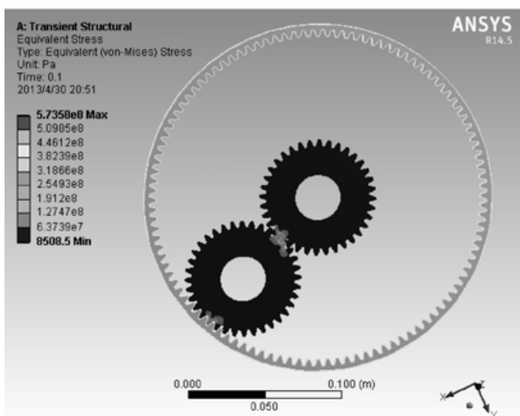


图 27-18　0.1s 时刻的等效应力云图

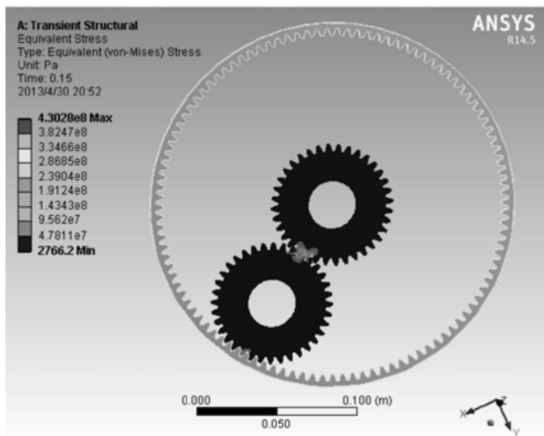


图 27-19　0.15s 时刻的等效应力云图

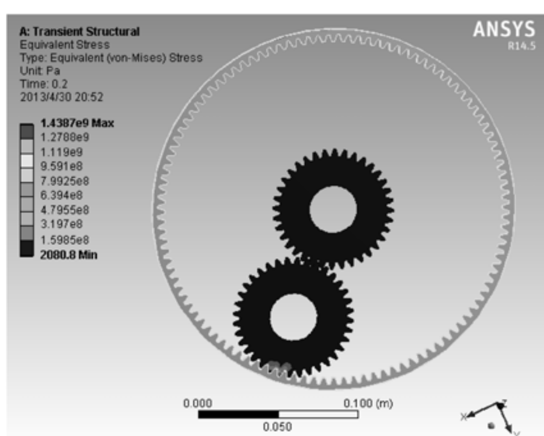


图 27-20　0.2s 时刻的等效应力云图

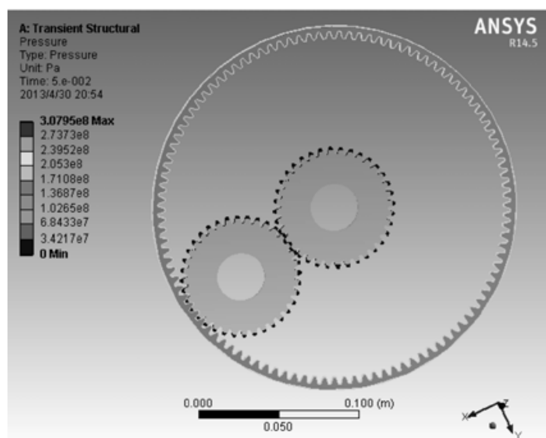


图 27-21　0.05s 时刻的接触压力云图

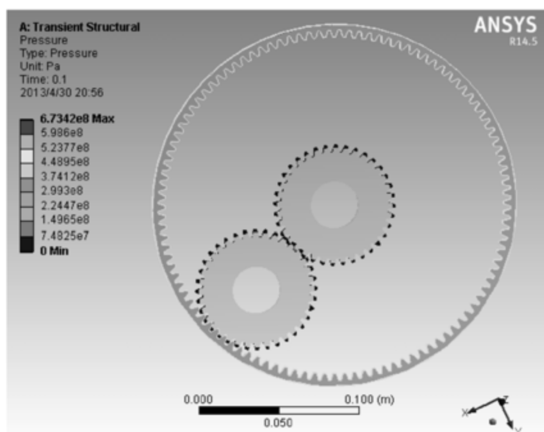


图 27-22　0.1s 时刻的接触压力云图

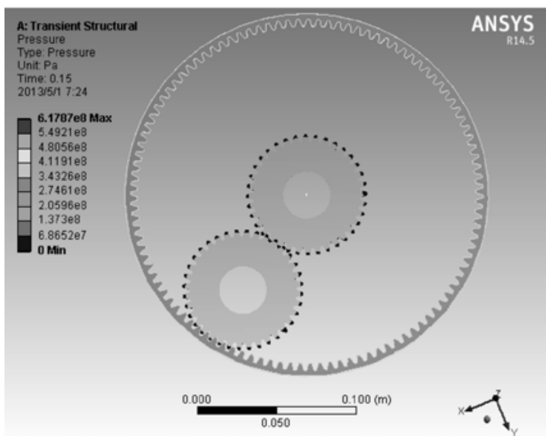


图 27-23　0.15s 时刻的接触压力云图

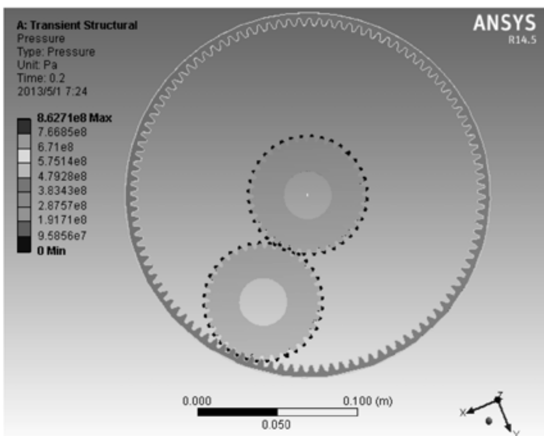


图 27-24　0.2s 时刻的接触压力云图

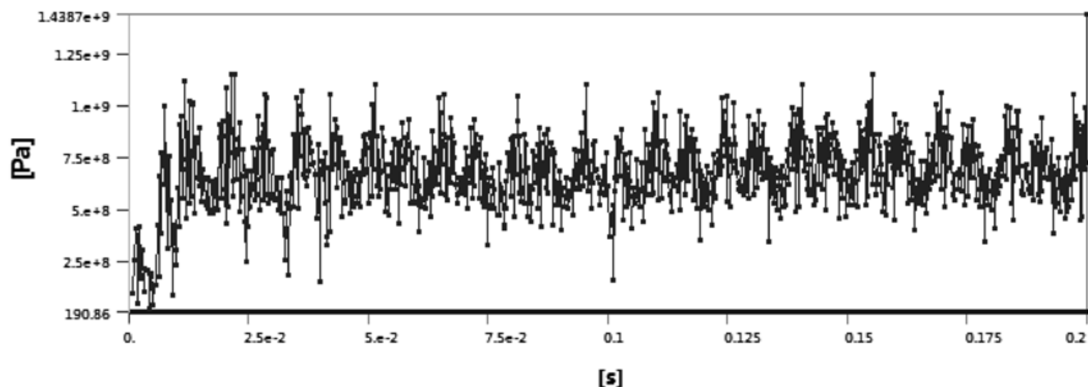


图 27-25　等效应力与时间的关系曲线

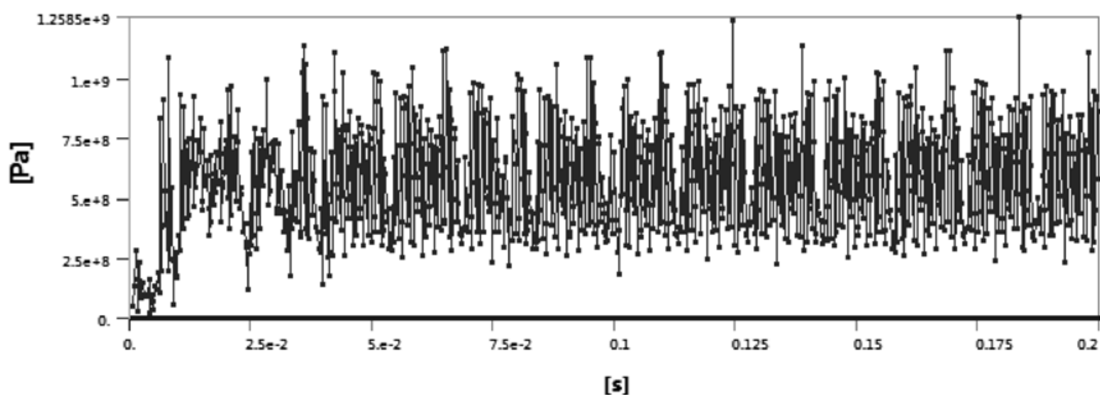


图 27-26　接触压力与时间的关系曲线

第 28 例　发动机连杆的应力疲劳分析



28.1　实例覆盖的知识点

读者通过学习该实例可以掌握如下 Workbench 的知识点。

1）静力学分析的基本分析步骤。

2）应力疲劳（高周疲劳）计算的基本步骤。

3）查看模型的疲劳参数方法。

4）恒定振幅载荷疲劳分析步骤。

5）随机载荷疲劳分析步骤。

6）疲劳分析的基本设置方法。

7）疲劳分析查看结果的方法。

28.2　模型

28.2.1　几何模型

图 28-1 给出了发动机连杆的三维模型，该模型的大半圆与发动机的曲轴相连接，小圆孔与发动机活塞销连接。

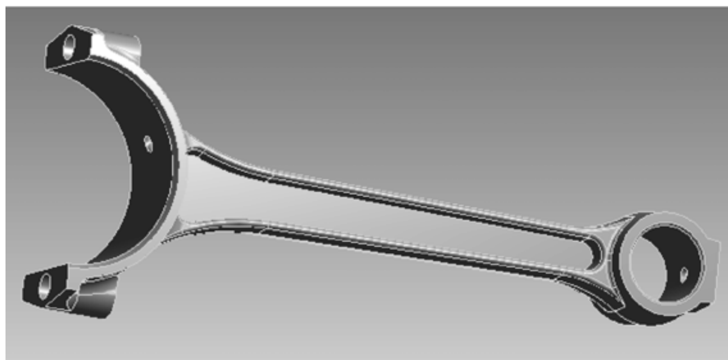


图 28-1　发动机连杆的三维模型

28.2.2　材料参数

该发动机连杆的弹性模量为 2.11E11Pa，弹性模量为 0.31。



28.2.3 边界条件和载荷

完全固定约束活塞销孔，在大半圆上方两侧的圆柱内面上施加圆柱支撑，保持径向固定，其他两个方向自由，并且在发动机连杆大半圆的表面上施加一个单位力，即 1N，在后面的疲劳分析通过放大该单位力获得疲劳分析结果。

28.3 GUI 操作

28.3.1 创建静力学分析系统

启动 Workbench，双击 Workbench Toolbox 的“Static Structural”，弹出如图 28-2 所示的“静力学分析系统”工程图。

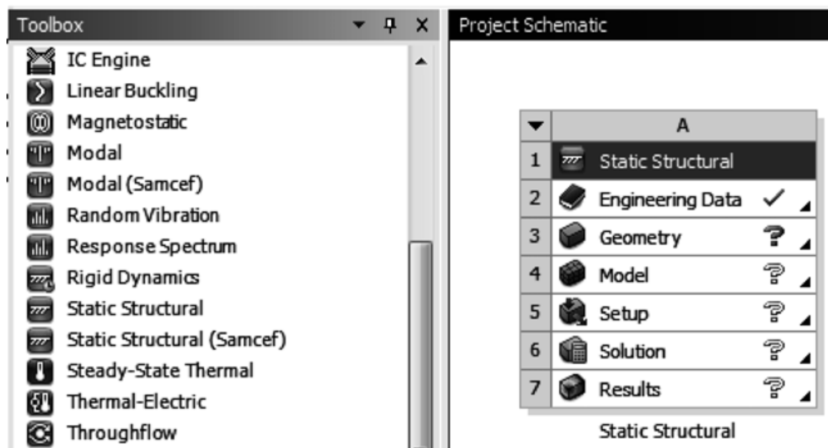


图 28-2 “静力学分析系统”工程图

28.3.2 定义材料数据

单击静力学分析系统中的“Engineering Data”子模块，选择“Structural Steel”上的结构钢选项，弹出如图 28-3 所示的“结构钢材料”数据表，重新输入杨氏模量设置为“2.11E11”，泊松比为“0.31”，此外对于疲劳分析必须提供 S-N 曲线或应变疲劳数据，数据表中的“Alternating Stress Mean Stress”选项用于定义材料的 S-N 曲线也就是应力疲劳分析的数据；单击“Alternating Stress Mean Stress”，则会在工程数据面板的右侧出现如图 28-4 和图 28-5 所示的结构钢应力疲劳数据输入表格以及对应于输入数据生成的 S-N 曲线，S-N 曲线有 3 个参数控制：“Mean Stress(Pa)”“Cycles”和“Alternating”，用户如果输入不同的参数，则会出现不同的 S-N 曲线，该实例保持默认参数。数据表中的“Strain-Life Parameters”选项用于定义材料的 E-N 曲线也就是应变疲劳分析的数据，单击“Strain-Life Parameters”，则会在工程数据面板的右侧出现如图 28-6 所示的结构钢应变疲劳数据列表和 E-N 曲线，E-N 曲线有 6 个控制参数：“Strength Coeffcient”“Strength”“Ductility

Coefficient”“Ductility Exponent”“Cyclic Strength Coefficient”和“Cyclic Strain Hardening Exponent”用户如果输入不同的参数，则会出现不同的 E-N 曲线，该实例保持默认参数。

Properties of Outline Row 3: Structural Steel

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
6	Isotropic Elasticity				
7	Derive from	Young's ...			
8	Young's Modulus	2.11E+11	Pa		
9	Poisson's Ratio	0.31			
10	Bulk Modulus	1.8509E+11	Pa		
11	Shear Modulus	8.0534E+10	Pa		
12	Alternating Stress Mean Stress	Tabular			
13	Interpolation	Log-Log			
14	Scale	1			
15	Offset	0	Pa		
16	Strain-Life Parameters				
17	Display Curve Type	Strain-Life			
18	Strength Coefficient	9.2E+08	Pa		
19	Strength Exponent	-0.106			
20	Ductility Coefficient	0.213			
21	Ductility Exponent	-0.47			
22	Cyclic Strength Coefficient	1E+09	Pa		
23	Cyclic Strain Hardening Exponent	0.2			
24	Tensile Yield Strength	2.5E+08	Pa		
25	Compressive Yield Strength	2.5E+08	Pa		
26	Tensile Ultimate Strength	4.6E+08	Pa		

图 28-3 “结构钢材料”数据表

	A
1	Mean Stress (Pa)
2	0
*	

	B	C
1	Cycles	Alternating Stress (Pa)
2	10	3.999E+09
3	20	2.827E+09
4	50	1.896E+09
5	100	1.413E+09
6	200	1.069E+09
7	2000	4.41E+08
8	10000	2.62E+08
9	20000	2.14E+08
10	1E+05	1.38E+08
11	2E+05	1.14E+08
12	1E+06	8.62E+07

图 28-4　结构钢应力疲劳数据输入表格

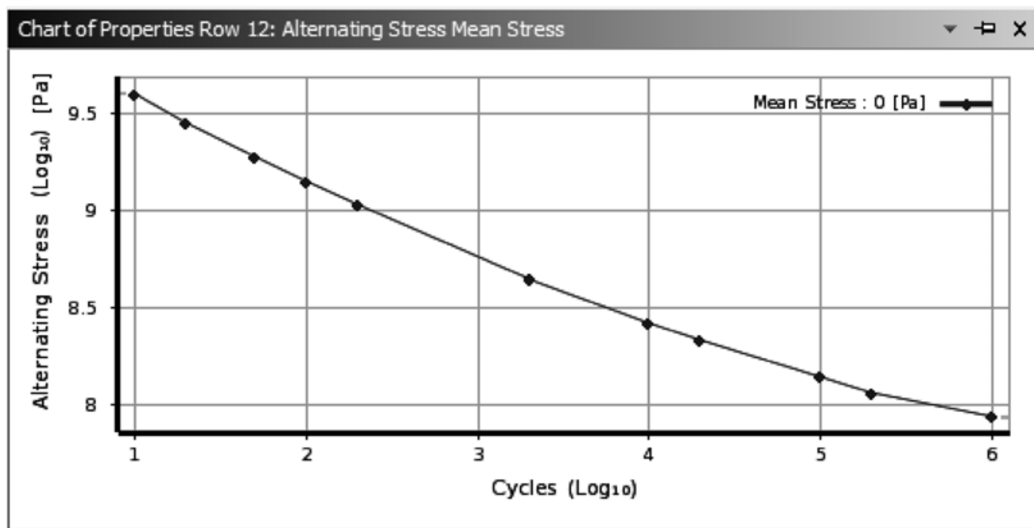
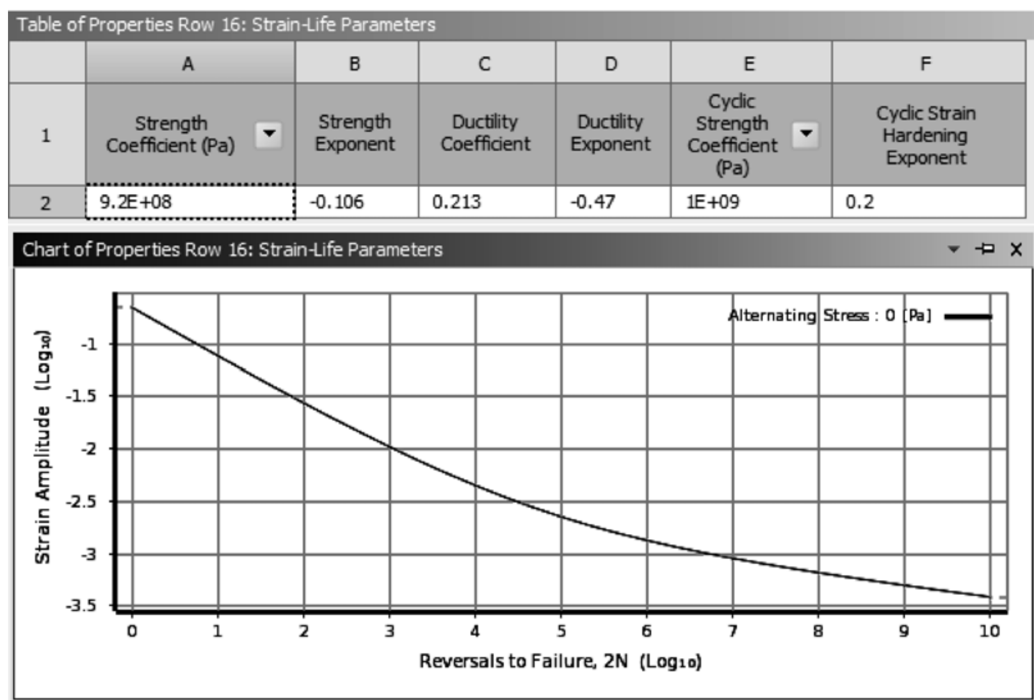


图 28-5　结构钢的 S-N 曲线


Table of Properties Row 16: Strain-Life Parameters

	A	B	C	D	E	F
1	Strength Coefficient (Pa)	Strength Exponent	Ductility Coefficient	Ductility Exponent	Cyclic Strength Coefficient (Pa)	Cyclic Strain Hardening Exponent
2	9.2E+08	-0.106	0.213	-0.47	1E+09	0.2

图 28-6　结构钢应变疲劳数据列表和 E-N 曲线

28.3.3 建立几何模型

如图 28-7 所示，右击模态分析系统中的几何体选项，选择 Import Gemoetry→Browse，打开工作目录文件夹，选择传动轴模型文件，单击“OK”按钮。

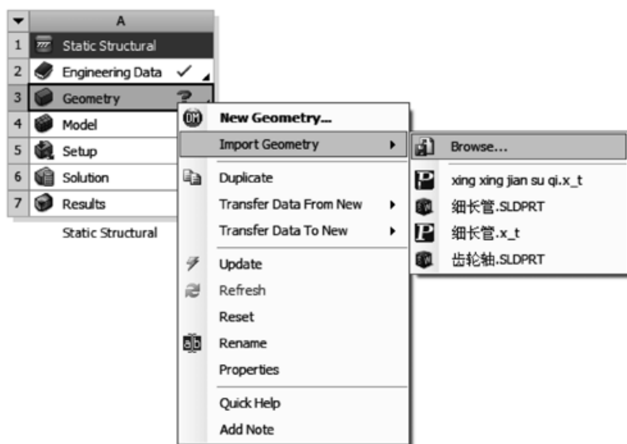


图 28-7 导入模型

28.3.4 创建有限元模型

选择静力学分析系统中的“Modal”选项，进入静力学分析系统，图 28-8 给出了“静力学分析系统”流程图。

1．为传动轴赋予材料

单击 Model→Geometry→Part1，则弹出如图 28-9 所示的“发动机连杆细节”设置面板，用户一般只需设置该面板的两个子选项，即“Definition”和“Material”选项。在“Definition”选项中，用户可以设置模型的“Stiffness Behavior”“Coordinate System”和“Reference Temperature”，在“Material”选项中可以为模型指定“Assignment”，本实例选用材料为“Structural Steel”。

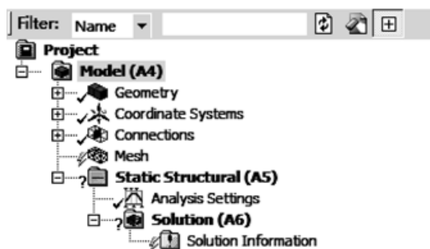


图 28-8 “静力学分析系统”流程图

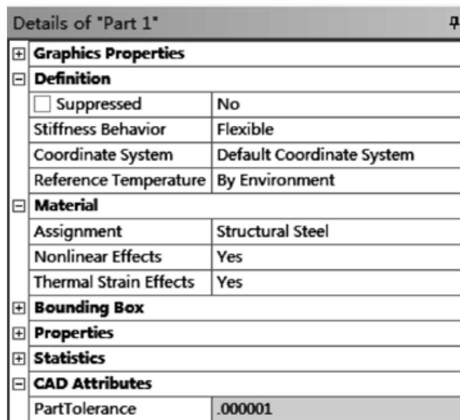


图 28-9 “发动机连杆细节”设置面板

2．网格划分

单击“Mesh”，弹出如图 28-10 所示的“网格划分细节”设置面板，设置“Relevance Center”为“Fine”，其他保持默认设置，然后右击“Mesh”，选择“Generate Mesh”。

Details of "Mesh"	
Defaults	
Physics Preference	Mechanical
Relevance	0
Sizing	
Use Advanced Size Function	Off
Relevance Center	Fine
Element Size	Default
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	Medium
Transition	Fast
Span Angle Center	Coarse
Minimum Edge Length	1.892e-004 m
Inflation	
Patch Conforming Options	
Triangle Surface Mesher	Program Controlled
Advanced	
Defeaturing	
Statistics	

图 28-10 “网格划分细节”设置面板

28.3.5 静力学分析

1. 静力学分析设置

单击“Static Structural”下方的“Analysis Settings”，则会出现如图 28-11 所示的“静力学求解分析细节”设置面板，设置“Large Deflection”为“On”，表明激活了大变形。

Details of "Analysis Settings"	
Step Controls	
Number Of Steps	1.
Current Step Number	1.
Step End Time	1. s
Auto Time Stepping	Program Controlled
Solver Controls	
Solver Type	Program Controlled
Weak Springs	Program Controlled
Large Deflection	On
Inertia Relief	Off
Restart Controls	
Nonlinear Controls	
Output Controls	
Analysis Data Management	
Visibility	

图 28-11 静力学分析细节设置面板

2. 施加固定约束

右击“Static Structural”，选择 Insert→Fixed Support，则在细节窗口出现如图 28-12 所示的“固定约束细节”设置面板，选择发动机连杆中的下方小孔表面，单击“Apply”按钮。

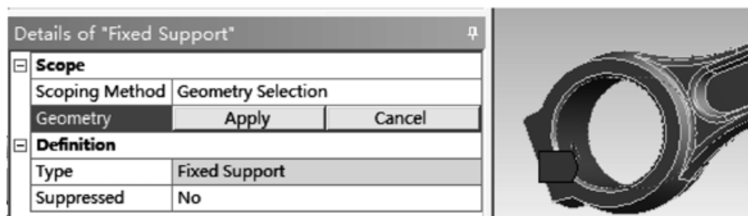


图 28-12 “固定约束细节”设置面板

3．施加圆柱支撑

右击“Static Structural”，选择 Insert→Cylindrical Support，则在细节窗口出现如图 28-13 所示的“圆柱支撑细节”设置面板，选择发动机连杆大半圆的两侧的螺栓孔，单击“Apply”按钮，设置“Radial”为“Fixed”，“Axial”和“Tangential”为“Fress”。

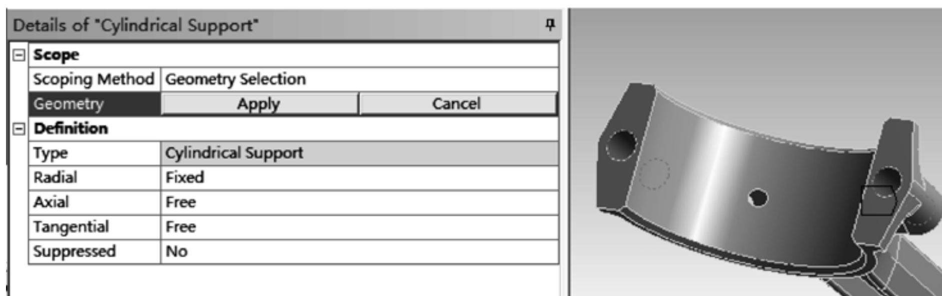


图 28-13 “圆柱支撑细节”设置面板

4．施加力

右击“Static Structural”，选择 Insert→Force，则在细节窗口出现如图 28-14 所示的“施加力细节”设置面板，选择发动机连杆上方大半圆表面，单击“Apply”按钮，设置施加方式为“Components”，输入“Z Component”为“-1”。

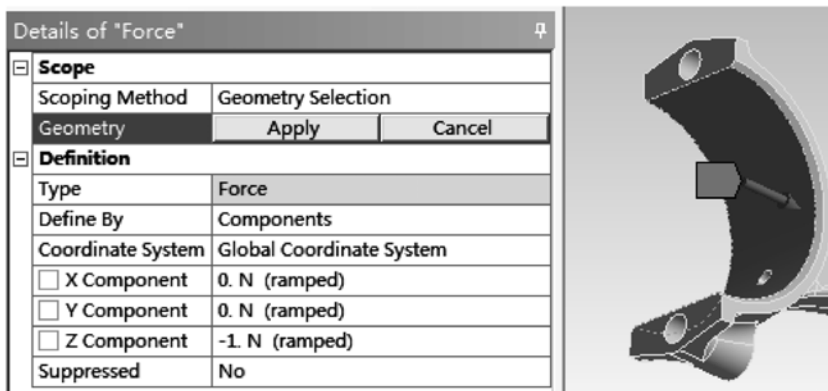


图 28-14 “施加力细节”设置面板

5．求解

选择 Static Structural→Solution，右击“Solution”，选择“Solve”。

6．观察结果

图 28-15 和图 28-16 分别给出了发动机连杆的总体变形和等效应力云图，具体查看方法用户可以参见本章视频教程。

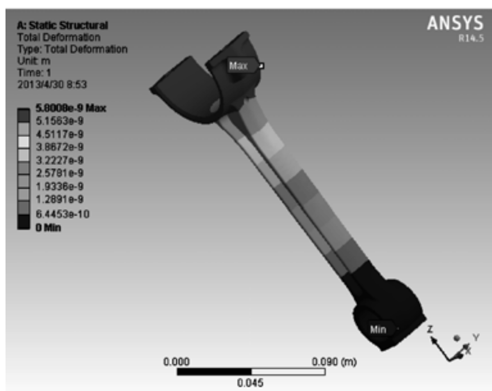


图 28-15　发动机连杆的变形等效云图

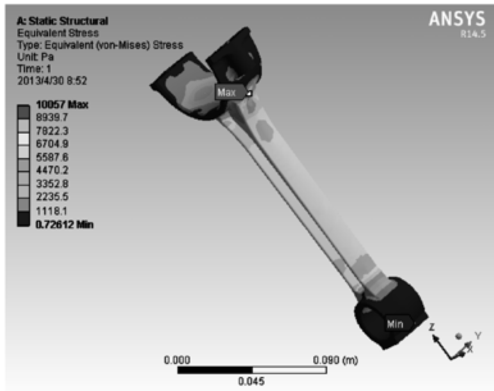


图 28-16　发动机连杆的等效应力云图

28.3.6 恒定振幅载荷疲劳分析

1．插入疲劳分析工具

右击“Solution”，选择 Insert→Fatigue→Fatigue Tool，则在细节窗口出现如图 28-17 所示的“疲劳工具细节”设置面板，设置疲劳强度系数为“0.85”，该系数用于修改疲劳试验与计算机模拟的差异可以考虑试件除了平均应力的其他影响。设置加载方式为“Fully Reversed”，“Scale Factor”为“5500”，表明将静力学的单位力放大 5500 倍，即施加对称循环载荷的最大拉力为 5500N，最小拉力为-5500N，因为该实例为高周疲劳问题即在外载荷作用下模型没有发生塑性变形，因此设置“Analysis Type”为“Stress Life”，其他设置保持默认设置，图 28-18 给出了“疲劳载荷变化”示意图。

Details of "Fatigue Tool"

Materials	
Fatigue Strength Factor (Kf)	0.85
Loading	
Type	Fully Reversed
Scale Factor	5500.
Definition	
Display Time	End Time
Options	
Analysis Type	Stress Life
Mean Stress Theory	None
Stress Component	Equivalent (Von Mises)
Life Units	
Units Name	cycles
1 cycle is equal to	1. cycles

图 28-17 “疲劳工具细节”设置面板

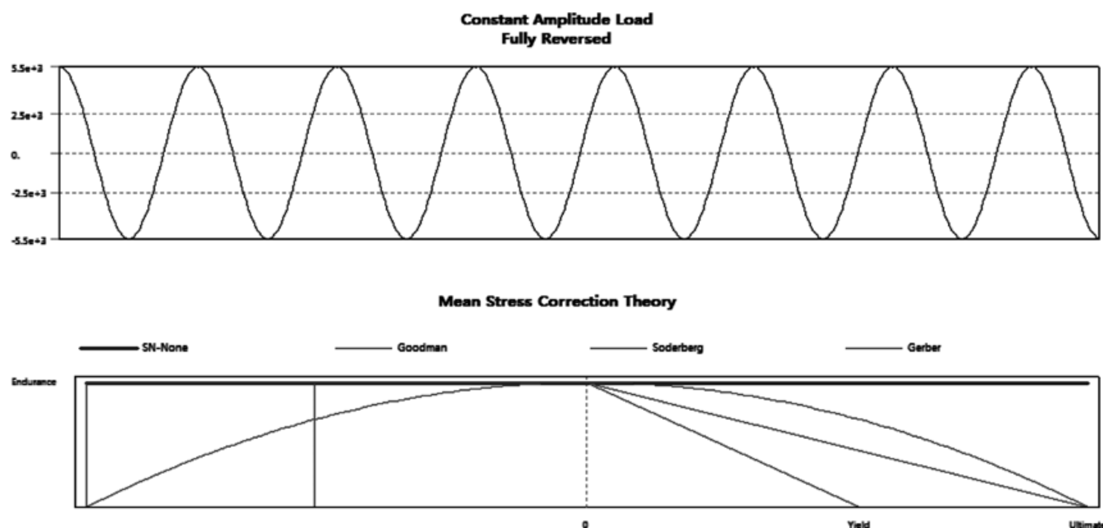


图 28-18 “疲劳载荷变化”示意图

2．设置疲劳计算项

（1）计算安全系数

右击“Fatigue Tool”，选择 Insert→Safety Factor，则在细节窗口出现如图 28-19 所示的“安全系数细节”设置面板，设置“Design Life”为“1E5”次循环。

Details of "Safety Factor"

Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	All Bodies
Definition	
Design Life	1.e+005 cycles
Type	Safety Factor
Identifier	
Suppressed	No
Results	
Minimum	

图 28-19 “安全系数细节”设置面板

（2）计算双轴显示

右击“Fatigue Tool”，选择 Insert→Biaxiality Indication。

（3）计算等效交替应力

右击“Fatigue Tool”，选择 Insert→Equivalent Alternating Stress。

（4）计算疲劳敏感度

右击“Fatigue Tool”，选择 Insert→Fatigue Sensitivity，则在细节窗口出现如图 28-20 所示的“疲劳计算敏感度细节”设置面板，设置载荷的“Lower Variation”为“100%”，即载荷为“5500”，疲劳载荷的“Upper Variation”为“500%”，即载荷为“27500”，输入曲线的插值点为“60”，其他设置保持默认。

Details of "Fatigue Sensitivity"	
Scope	
Geometry	All Bodies
Definition	
Sensitivity For	Life
Suppressed	No
Options	
Lower Variation	100. %
Upper Variation	500. %
Number of Fill Points	60
Chart Viewing Style	Linear

图 28-20　“疲劳敏感度细节”设置面板

3．开始疲劳计算

选择 Fatigue Tool→Solution，右击“Solution”，选择“Solve”。

4．查看结果

图 28-21～图 28-23 分别给出了发动机连杆的安全系数、双轴应力和交替等效应力云图，图 28-24 给出了发动机连杆的疲劳敏感度曲线，具体查看方法用户可以参见本章视频教程。

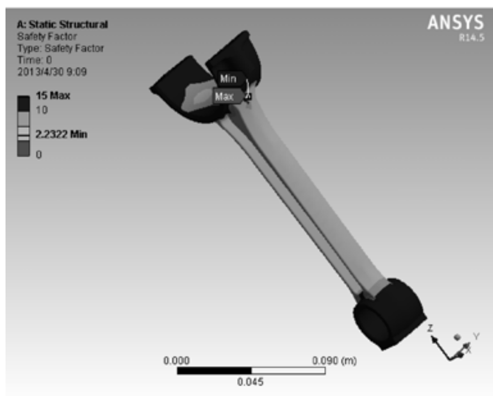


图 28-21　发动机连杆的安全系数云图

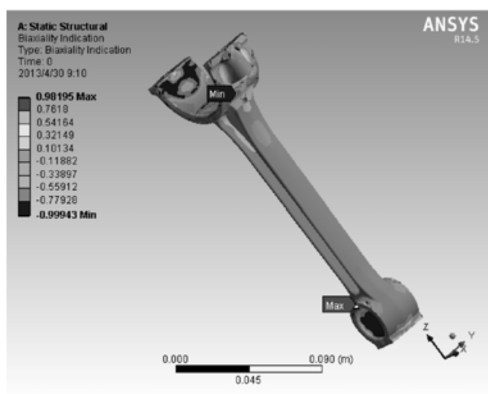


图 28-22　发动机连杆的双轴应力云图

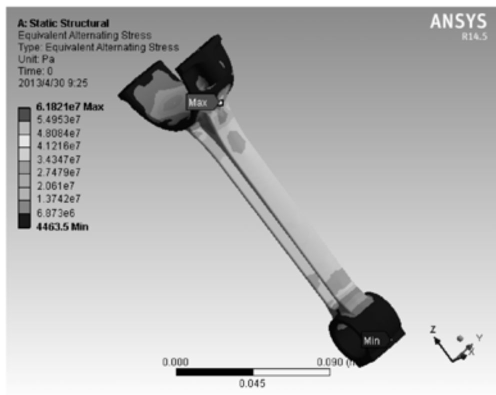


图 28-23　发动机连杆的交替等效应力云图

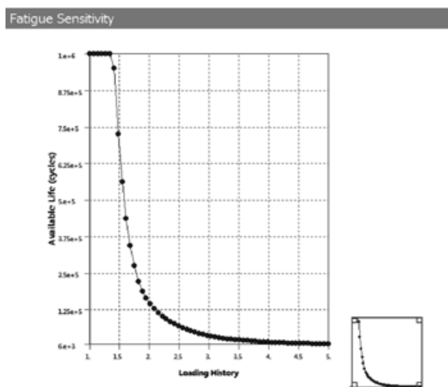


图 28-24　发动机连杆的疲劳敏感度曲线

28.3.7 随机载荷疲劳分析

1．插入疲劳分析工具

右击“Solution”，选择 Insert→Fatigue→Fatigue Tool，则在细节窗口出现如图 28-25 所示的“疲劳工具细节”设置面板，设置疲劳强度系数为“0.85”，疲劳载荷类型为“History Data”，选择时程数据位置，弹出如图 28-26 所示的“打开”对话框，选择 SAEBracketHistory.dat 文件，单击“打开”按钮，设置“Scale Factor”为“22”，表明将时程载荷数据放大 22 倍，分析类型为“应力寿命”，平均应力理论设置为“Soderberg”，应力分量为“Singed Von Mises”，设置“Bin Siz”为“50”，即雨流矩阵和损伤矩阵尺寸为 50×50，图 28-27 给出了随机载荷和平均应力理论示意图。

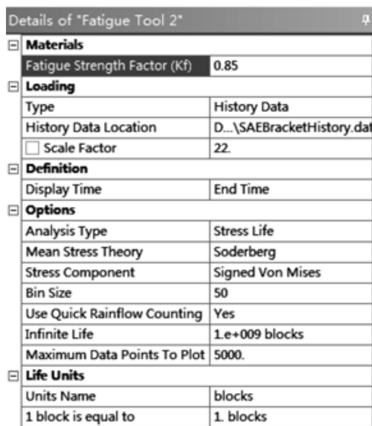


图 28-25 “疲劳分析工具细节”设置面板

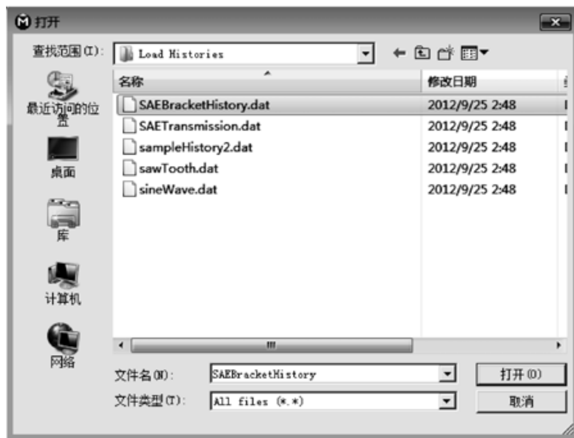


图 28-26 “打开”对话框

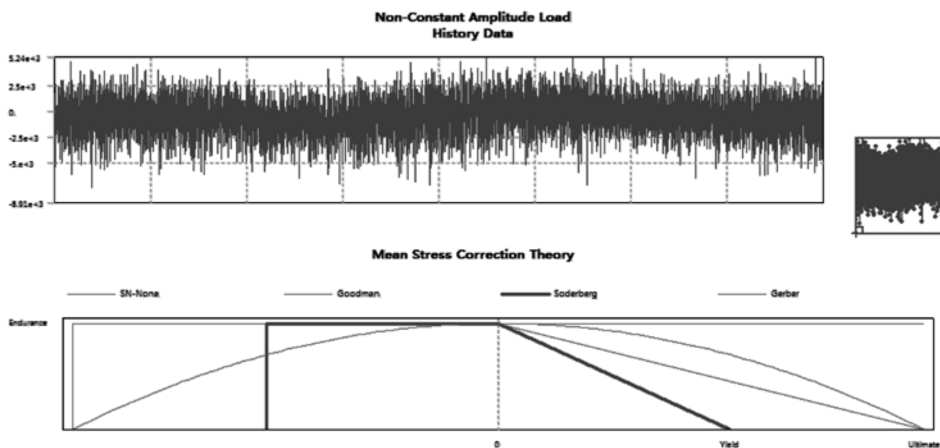


图 28-27 随机疲劳载荷和平均应力理论示意图

2．设置疲劳计算项

（1）计算安全系数

右击“Fatigue Tool”，选择 Insert→Safety Factor，则在细节窗口出现如图 28-28 所示的

“安全系数细节”设置面板，设置“Design Life”为“2000blocks”。

（2）计算寿命

右击“Fatigue Tool”，选择 Insert→Life。

（3）计算损伤

右击“Fatigue Tool”，选择 Insert→Damage，则在细节窗口出现如图 28-29 所示的“损伤细节”设置面板，设置“Design Life”为“1000blocks”。

Details of "Safety Factor"	
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	All Bodies
Definition	
Design Life	2000. blocks
Type	Safety Factor
Identifier	
Suppressed	No
Results	
Minimum	

图 28-28 “安全系数细节”设置面板

Details of "Damage"	
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	All Bodies
Definition	
Design Life	1000. blocks
Type	Damage
Identifier	
Suppressed	No
Results	
Maximum	

图 28-29 “损伤细节”设置面板

（4）计算疲劳敏感度

右击“Fatigue Tool”，选择 Insert→Fatigue Sensitivity，则在细节窗口出现如图 28-30 所示的“疲劳计算敏感度细节”设置面板，设置载荷的“Lower Variation”为“50%”，疲劳载荷的“Upper Variation”为“400%”，输入曲线的插值点为“50”，其他设置保持默认。

Details of "Fatigue Sensitivity"	
Scope	
Geometry	All Bodies
Definition	
Sensitivity For	Life
Suppressed	No
Options	
Lower Variation	50. %
Upper Variation	400. %
Number of Fill Points	50
Chart Viewing Style	Linear

图 28-30 “疲劳敏感度细节”设置面板

（5）计算疲劳雨流矩阵

右击“Fatigue Tool”，选择 Insert→Rainflow Matrix。

（6）计算损伤矩阵

右击“Fatigue Tool”，选择 Insert→Damage Matrix。

3．开始疲劳计算

选择 Fatigue Tool1→Solution，右击“Solution”，选择“Solve”。

4．查看结果

图 28-31～图 28-33 分别给出了发动机连杆的安全系数、寿命和损伤云图，图 28-34 给

出了发动机连杆的疲劳分析敏感度曲线，图 28-35 和图 28-36 分别给出了发动机连杆的疲劳雨流矩阵和疲劳损伤矩阵，具体查看方法读者可以参见本章的视频教程。

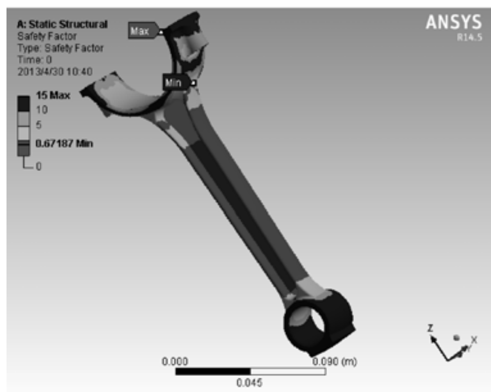


图 28-31 发动机连杆的安全系数云图

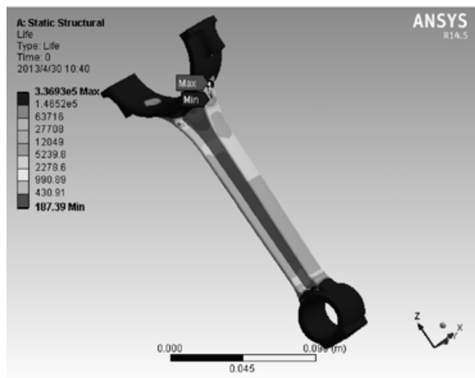


图 28-32 发动机连杆的寿命云图

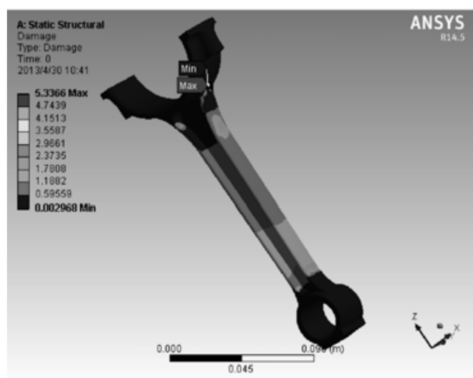


图 28-33 发动机连杆的损伤云图

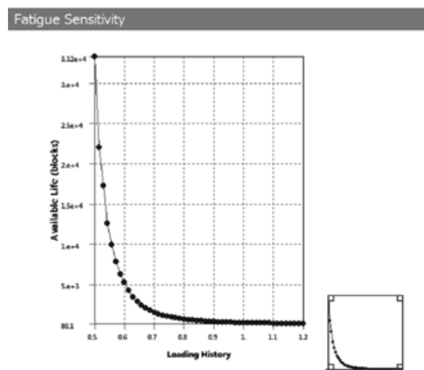


图 28-34 发动机连杆的疲劳分析敏感度曲线

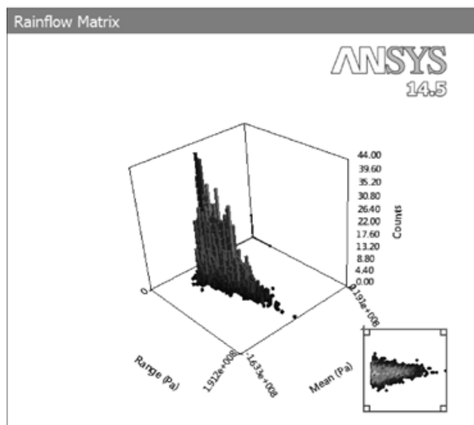


图 28-35 发动机连杆雨流矩阵云图

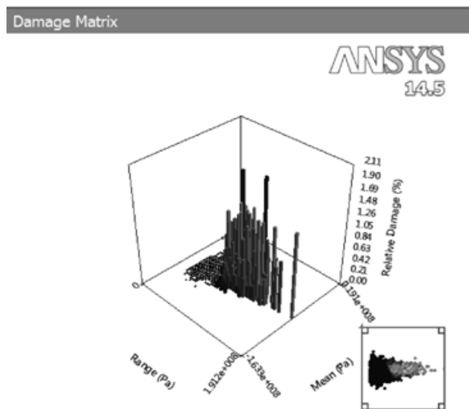


图 28-36 发动机连杆疲劳损伤矩阵云图

第 29 例　轴类零件的应变疲劳分析

29.1　实例覆盖的知识点

读者通过学习该实例可以掌握如下 Workbench 的知识点。

1）静力学分析的基本分析步骤。

2）应变疲劳（低周疲劳）计算的基本步骤。

3）查看模型的疲劳参数方法。

4）设置材料的双线性等向强化模型的方法。

5）恒定振幅载荷疲劳分析步骤。

6）随机载荷疲劳分析步骤。

7）疲劳分析的基本设置方法。

8）疲劳分析查看结果的方法。

29.2　模型

29.2.1 几何模型

图 29-1 给出了轴类零件的三维图，该轴类零件为一个具有圆滑过渡的阶梯轴。

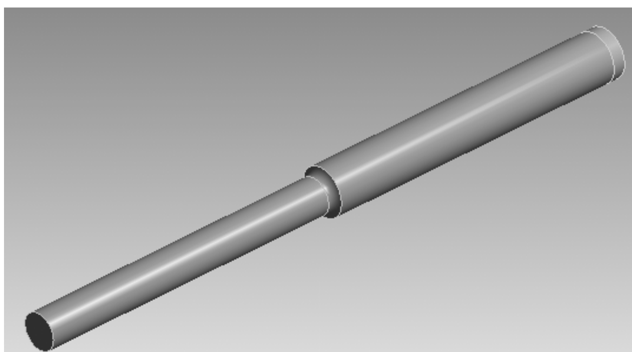


图 29-1　轴类零件的三维模型

29.2.2 材料参数

该轴类零件的应力-应变关系假设为双线性等向强化模型，弹性模量为 2.12E11Pa，泊松比为 0.31，屈服应力为 300MPa，切线模量为 2E9Pa。

29.2.3 边界条件和载荷

完全固定轴类零件的大端面，在轴类零件的小端面施加一个竖直方向的单位力 1。



29.3 GUI 操作

29.3.1 创建静力学分析系统

启动 Workbench，双击 Workbench Toolbox 的“Static Structural”，弹出如图 29-2 所示的“静力学分析系统”工程图。

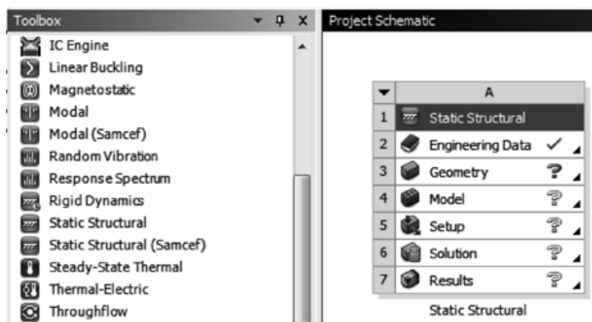


图 29-2 “静力学分析系统”工程图

29.3.2 定义材料数据

单击静力学分析系统中的“Engineering Data”子模块，选择“Structural Steel”上的“结构钢”选项，双击“Toolbox”下方的 Plasticity→Bilinear Isotropic Hardening，弹出如图 29-3 所示的“结构钢材料”数据表，重新输入杨氏模量设置为“2.11E11”，泊松比为“0.31”，输入屈服应力为“3E8”，切线模量为“2E9”，保持结构钢的疲劳参数。

Properties of Outline Row 3: Structural Steel

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Density	7850	kg m^-3		
3	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion				
4	Coefficient of Thermal Expansion	1.2E-05	C^-1		
5	Reference Temperature	22	C		
6	Isotropic Elasticity				
7	Derive from	Young's ...			
8	Young's Modulus	2.12E+11	Pa		
9	Poisson's Ratio	0.31			
10	Bulk Modulus	1.8596E+11	Pa		
11	Shear Modulus	8.0916E+10	Pa		
12	Bilinear Isotropic Hardening				
13	Yield Strength	3E+08	Pa		
14	Tangent Modulus	2E+09	Pa		
15	Alternating Stress Mean Stress	Tabular			
16	Interpolation	Log-Log			
17	Scale	1			
18	Offset	0	Pa		

图 29-3 “结构钢材料”数据表

29.3.3 建立几何模型

如图 29-4 所示，右击模态分析系统中的几何体选项，选择 Import Geometry→Browse，打开工作目录文件夹，选择轴类零件模型文件，单击“OK”按钮。

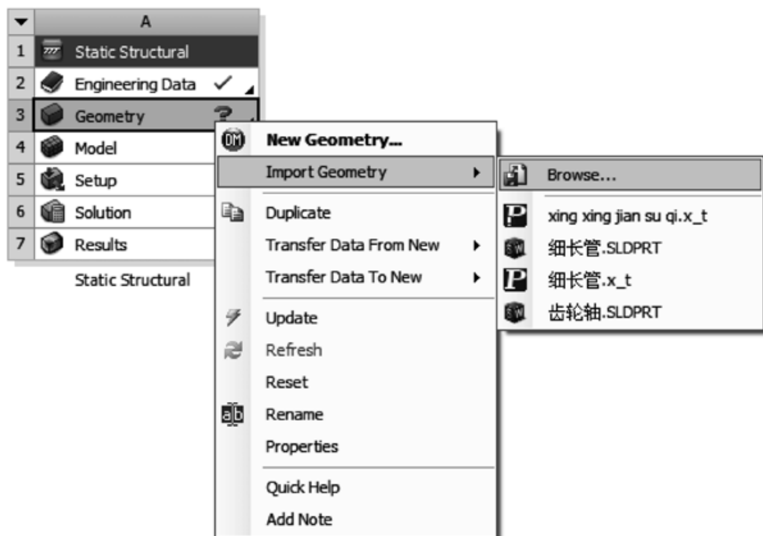


图 29-4　导入模型

29.3.4 创建有限元模型

选择静力学分析系统中的“Modal”选项，进入静力学分析系统，图 29-5 给出了“静力学分析系统”流程图。

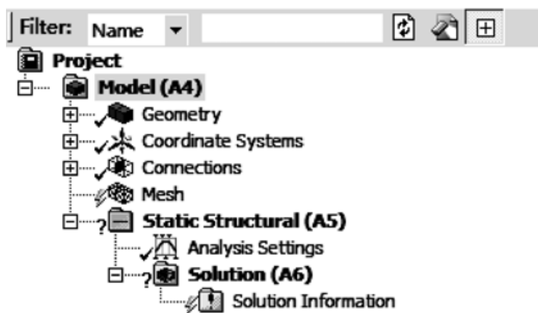


图 29-5　“静力学分析系统”流程图

1．为轴类零件赋予材料

单击 Model→Geometry→轴类零件，则弹出如图 29-6 所示的“轴类零件材料细节”设置面板，用户一般只需设置该面板的两个子选项，即“Definition”和“Material”选项。在“Definition”选项中，用户可以设置模型的“Stiffness Behavior”“Coordinate System”和“Reference Temperature”，在“Material”选项中可以为模型指定“Assignment”，本实例选用

材料为“Structural Steel”。

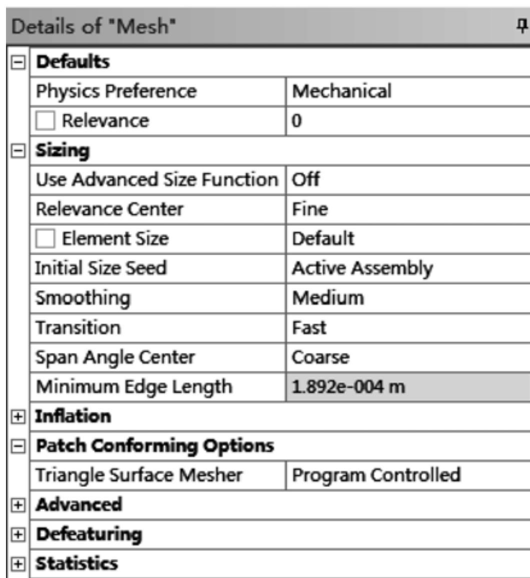


Details of "轴类零件"	
Graphics Properties	
Definition	
Suppressed	No
Stiffness Behavior	Flexible
Coordinate System	Default Coordinate System
Reference Temperature	By Environment
Material	
Assignment	Structural Steel
Nonlinear Effects	Yes
Thermal Strain Effects	Yes
Bounding Box	
Properties	
Statistics	

图 29-6 “轴类零件细节”设置面板

2．网格划分

单击“Mesh”，弹出如图 29-7 所示的“网格划分细节”设置面板，设置“Relevance Center”为“Fine”，其他保持默认设置，然后右击“Mesh”，选择“Generate Mesh”。



Details of "Mesh"	
Defaults	
Physics Preference	Mechanical
Relevance	0
Sizing	
Use Advanced Size Function	Off
Relevance Center	Fine
Element Size	Default
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	Medium
Transition	Fast
Span Angle Center	Coarse
Minimum Edge Length	1.892e-004 m
Inflation	
Patch Conforming Options	
Triangle Surface Mesher	Program Controlled
Advanced	
Defeaturing	
Statistics	

图 29-7 “网格划分细节”设置面板

29.3.5 静力学分析

1．静力学分析设置

单击“Static Structural”下方的“Analysis Settings”，则会出现如图 29-8 所示的“静力学求解分析细节”设置面板，设置“Large Deflection”为“On”，表明激活了大变形。

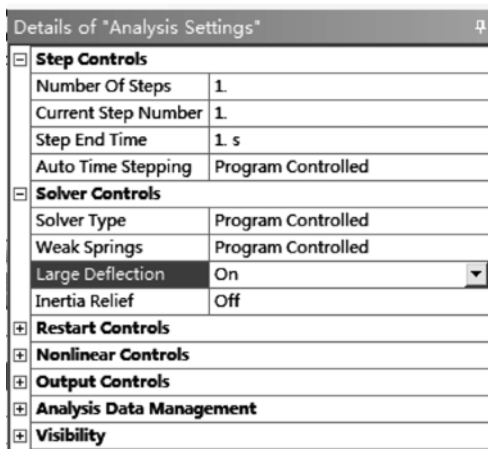


图 29-8 “静力学分析细节”设置面板

2．施加固定约束

右击“Static Structural”，选择 Insert→Fixed Support，则在细节窗口出现如图 29-9 所示的“固定约束细节”设置面板，选择轴类零件的固定圈，单击“Apply”按钮。

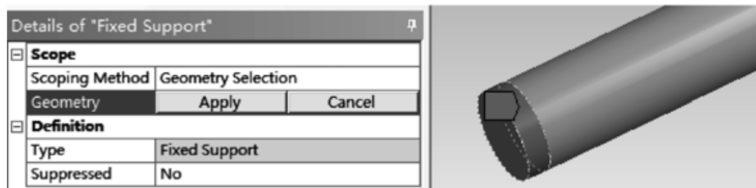


图 29-9 “固定约束细节”设置面板

3．施加力

右击“Static Structural”，选择 Insert→Force，则在细节窗口出现如图 29-10 所示的“力细节”设置面板，选择轴类零件的另一个端面，单击“Apply”按钮，输入“Y Component”为“40000”。

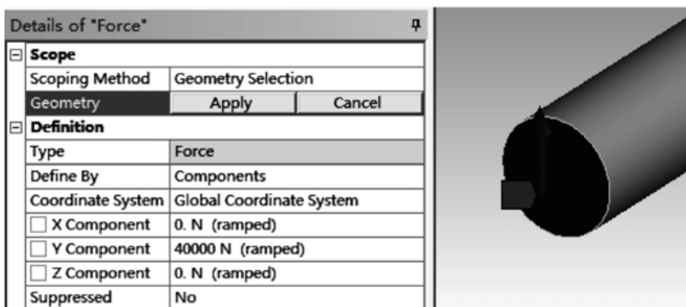


图 29-10 “力细节”设置面板

4．求解

选择 Static Structural→Solution，右击“Solution”，选择“Solve”。

5．观察结果

图 29-11 和图 29-12 分别给出了轴类零件的等效应力和等效塑性应变云，具体查看方法读者可以参见本章视频教程。

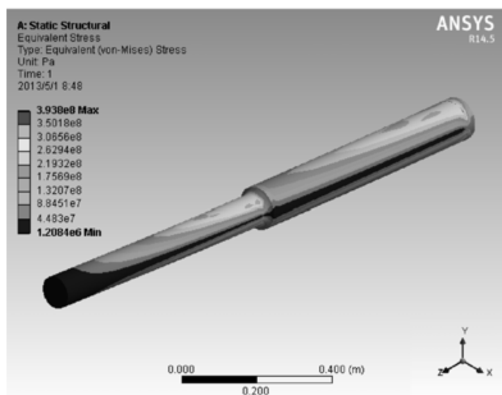


图 29-11　轴类零件的等效应力云图

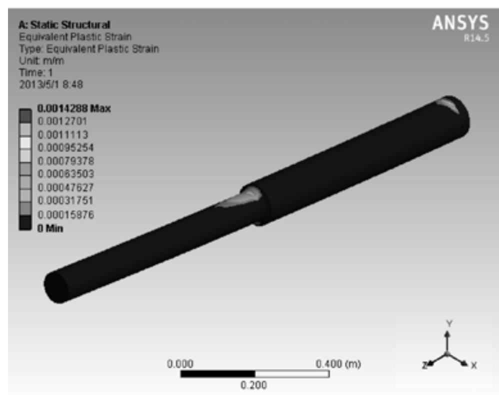


图 29-12　轴类零件的等效塑性应变云图

29.3.6 恒定振幅载荷疲劳分析

1．插入疲劳分析工具

右击“Solution”，选择 Insert→Fatigue>Fatigue Tool，则在细节窗口出现如图 29-13 所示的“疲劳工具细节”设置面板，设置疲劳强度系数为“0.9”，该系数用于修改疲劳试验与计算机模拟的差异可以考虑试件的除了平均应力的其他影响。设置加载方式为“Fully Reversed”，“Scale Factor”为“1.8”，表明将静力学的力放大 1.8 倍，即施加对称循环载荷的最大拉力为“72000N”，最小拉力为“-72000N”，因为该实例为低周疲劳问题即在外载荷作用下模型发生了塑性变形，因此设置“Analysis Type”为“Stress Life”，“Mean Stress Theory”选择“Morrow”，“Stress Component”设置为“Max Shear”，无限寿命设置为“1E4”，其他设置保持默认设置，最后生成图 29-14 所示的疲劳载荷变化示意图。

Details of "Fatigue Tool"

Materials	
Fatigue Strength Factor (Kf)	0.9
Loading	
Type	Fully Reversed
Scale Factor	1.8
Definition	
Display Time	End Time
Options	
Analysis Type	Strain Life
Mean Stress Theory	Morrow
Stress Component	Max Shear
Infinite Life	10000 cycles
Life Units	
Units Name	cycles
1 cycle is equal to	1. cycles

图 29-13　“疲劳工具细节”设置面板

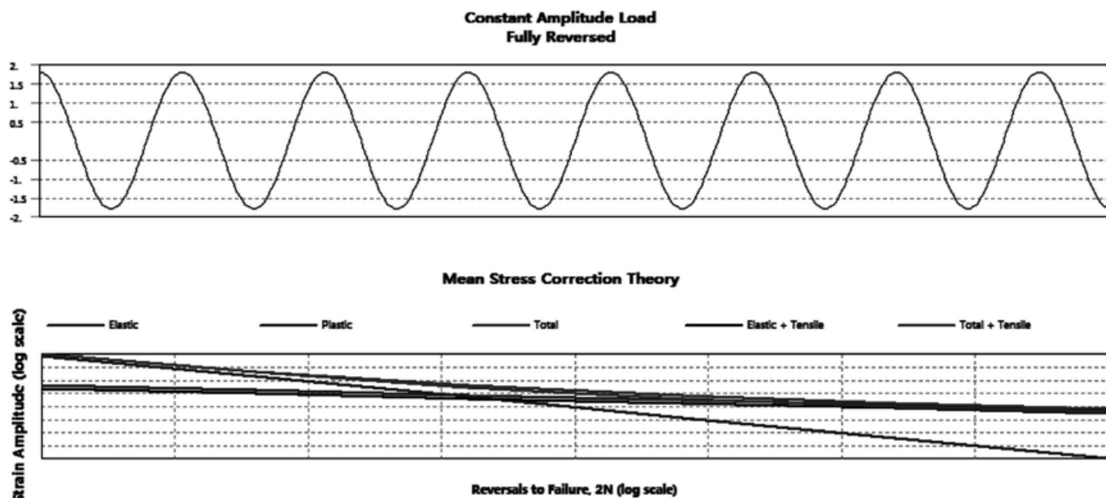


图 29-14　疲劳载荷变化示意图

2．设置疲劳计算项

（1）计算安全系数

右击“Fatigue Tool”，选择 Insert→Safety Factor，则在细节窗口出现如图 29-15 所示的“安全系数细节”设置面板，设置“Design Life”为“1000 cycles”。

（2）计算寿命

右击“Fatigue Tool”，选择 Insert→Life。

（3）计算损伤

右击“Fatigue Tool”，选择 Insert→Damage，则在细节窗口出现如图 29-16 所示的“损伤细节”设置窗口，输入“Design Life”为“1000 cycles”。

Details of "Safety Factor"

Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	All Bodies
Definition	
Design Life	1000. cycles
Type	Safety Factor
Identifier	
Suppressed	No
Results	
Minimum	
Minimum Occurs On	

图 29-15　“安全系数细节”设置面板

Details of "Damage"

Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	All Bodies
Definition	
Design Life	1000. cycles
Type	Damage
Identifier	
Suppressed	No
Results	
Maximum	
Maximum Occurs On	

图 29-16　“损伤细节”设置窗口

（4）计算疲劳敏感度

右击“Fatigue Tool”，选择 Insert→Fatigue Sensitivity，则在细节窗口出现如图 29-17 所示的“疲劳计算敏感度细节”设置面板，设置载荷的“Lower Variation”为“30%”，疲劳载荷的“Upper Variation”为“180%”，输入曲线的插值点为“50”，其他设置保持默认。

3．开始疲劳计算

选择 Fatigue Tool→Solution，右击“Solution”，选择“Solve”。

Details of "Fatigue Sensitivity"	
Scope	
Geometry	All Bodies
Definition	
Sensitivity For	Life
Suppressed	No
Options	
Lower Variation	30. %
Upper Variation	180. %
Number of Fill Points	50
Chart Viewing Style	Linear

图 29-17　“疲劳敏感度细节”设置面板

4．查看结果

图 29-18～图 29-20 分别给出了轴类零件的安全系数、寿命和双轴应力云图，图 29-21 给出了轴类零件的疲劳敏感度云图，具体查看方法用户可以参见本章视频教程。

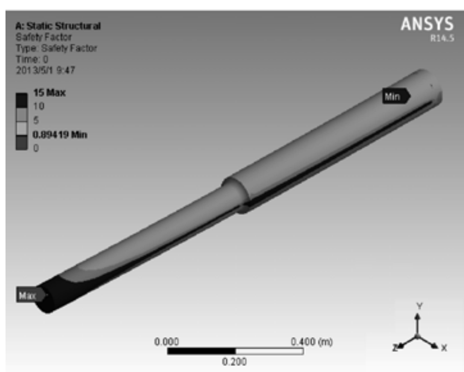


图 29-18　轴类零件 1000 次循环后的安全系数云图

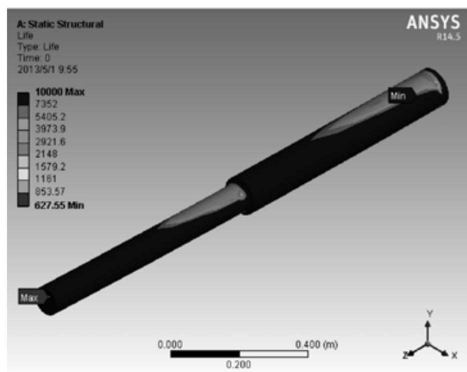


图 29-19　轴类零件的寿命云图

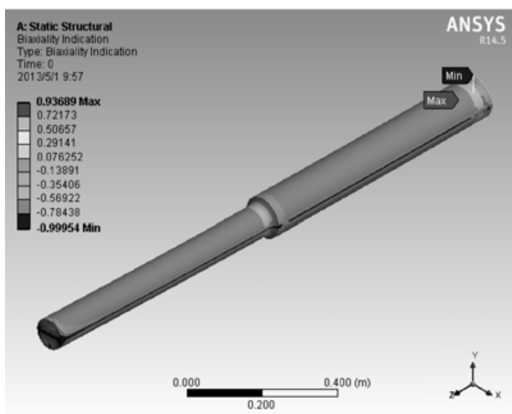


图 29-20　轴类零件的双轴应力云图

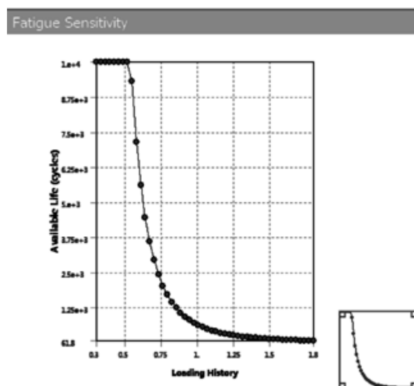


图 29-21　轴类零件的疲劳敏感度云图

29.3.7 随机载荷疲劳分析

1．插入疲劳分析工具

右击“Solution”，选择 Insert→Fatigue→Fatigue Tool，则在细节窗口出现如图 29-22 所

示的“疲劳分析工具细节”设置面板，设置疲劳强度系数为“0.85”，疲劳载荷类型为“History Data”，选择时程数据位置，弹出如图 29-23 所示“打开”对话框，选择 SAETransmission.dat 文件，单击“打开”按钮，设置“Scale Factor”为“0.003”，表明将时程载荷数据放大 0.003 倍，分析类型为应变寿命，平均应力理论设置为“Morrow”，应力分量为“Singed Von Mises”，设置“Bin Siz”为“32”，即雨流矩阵和损伤矩阵尺寸为 32×32，设置无限寿命为“1E6”，图 29-24 给出了随机载荷和平均应力理论示意图。

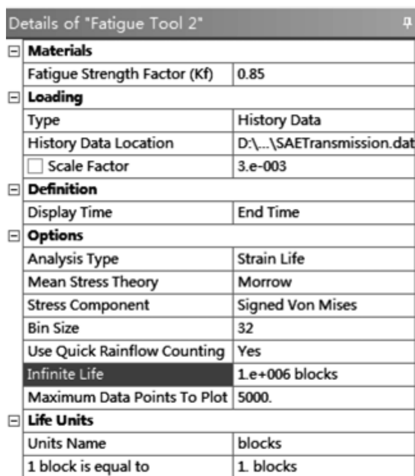


图 29-22 “疲劳分析工具细节”设置面板

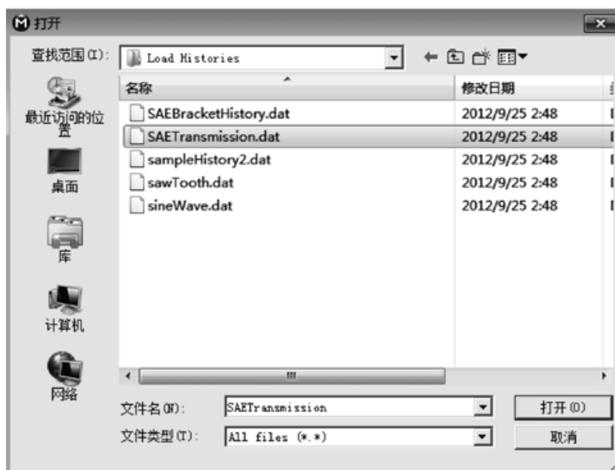


图 29-23 “打开”对话框

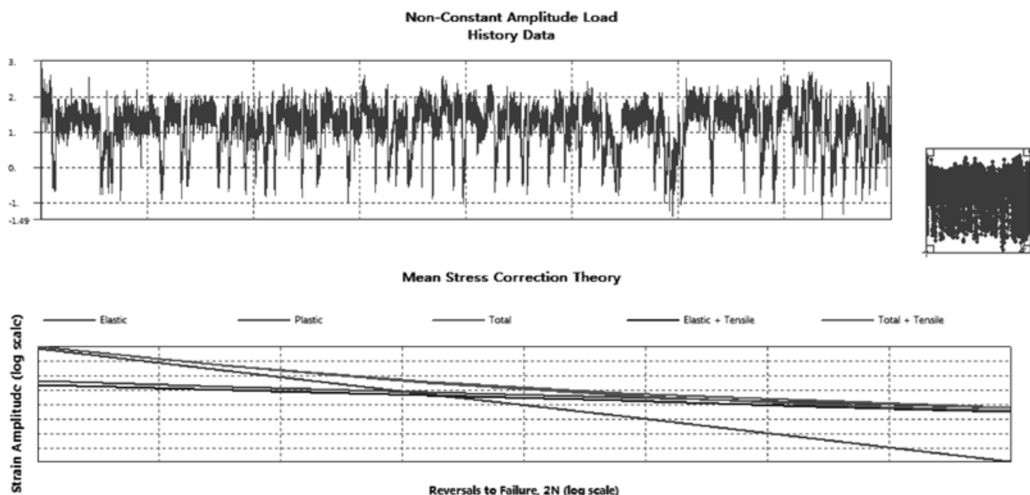
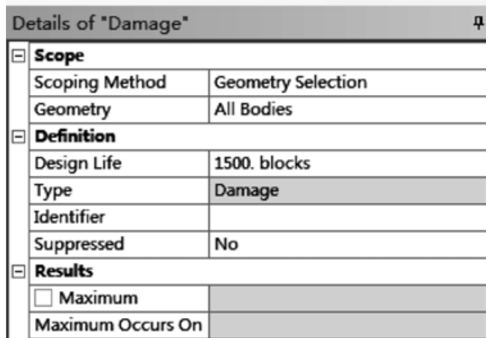


图 29-24 随机载荷和平均应力理论示意图

2．设置疲劳计算项

（1）计算损伤

右击“Fatigue Tool”，选择 Insert→Damage，则在细节窗口出现如图 29-25 所示的“损伤细节”设置面板，设置“Design Life”为“1500 blocks”。



Details of "Damage"	
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	All Bodies
Definition	
Design Life	1500. blocks
Type	Damage
Identifier	
Suppressed	No
Results	
Maximum	
Maximum Occurs On	

图 29-25 “损伤细节”设置面板

（2）计算寿命

右击“Fatigue Tool”，选择 Insert→Life。

（3）计算双轴应力

右击“Fatigue Tool”，选择 Insert→Biaxiality Indication。

（4）计算疲劳雨流矩阵

右击“Fatigue Tool”，选择 Insert→Rainflow Matrix。

（5）计算损伤矩阵

右击“Fatigue Tool”，选择 Insert→Damage Matrix。

（6）计算应变疲劳滞回曲线

右击“Fatigue Tool”，选择 Insert→Hysteresis。

3．开始疲劳计算

选择 Fatigue Tool→Solution，右击“Solution”，选择“Solve”。

4．查看结果

图 29-26～图 29-28 分别给出了轴类零件的损伤，寿命和双轴应力云图，图 28-29 给出了轴类零件的应变疲劳的滞回曲线，图 29-30 和图 29-31 分别给出了轴类零件的雨流矩阵和损伤矩阵云图，具体查看方法读者可以参见本章视频教程。

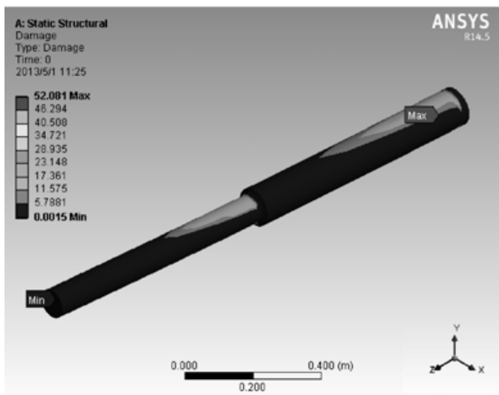


图 29-26　轴类零件的损伤云图

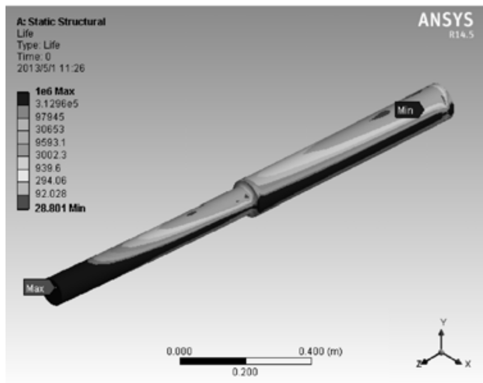


图 29-27　轴类零件的寿命云图



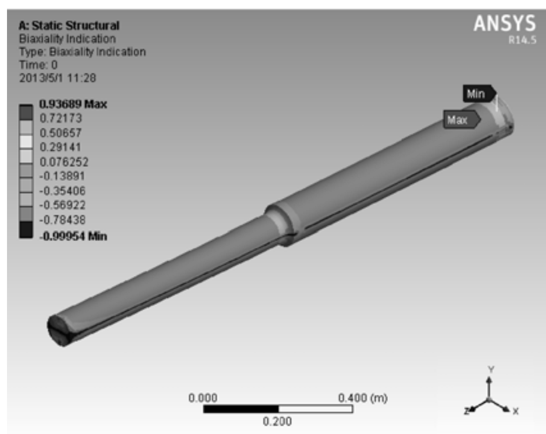


图 29-28　轴类零件的双轴应力云图

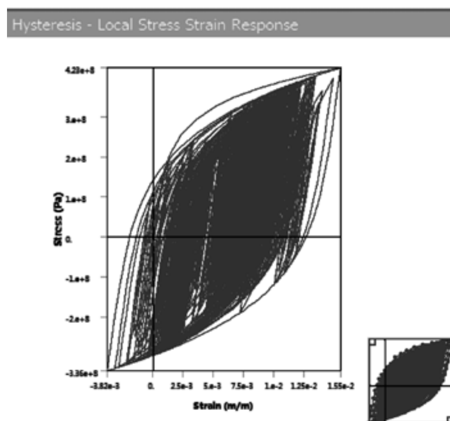


图 29-29　轴类零件的应变疲劳的滞回曲线

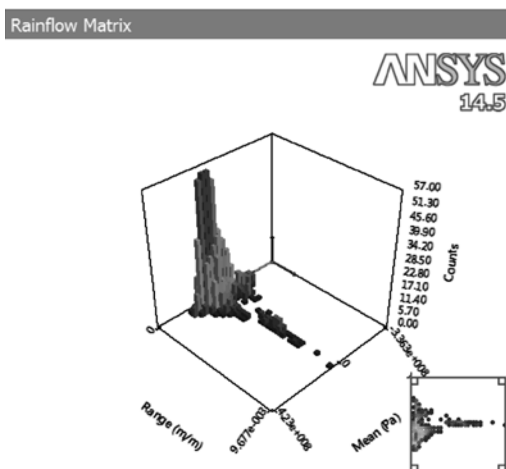


图 29-30　轴类零件雨流矩阵云图

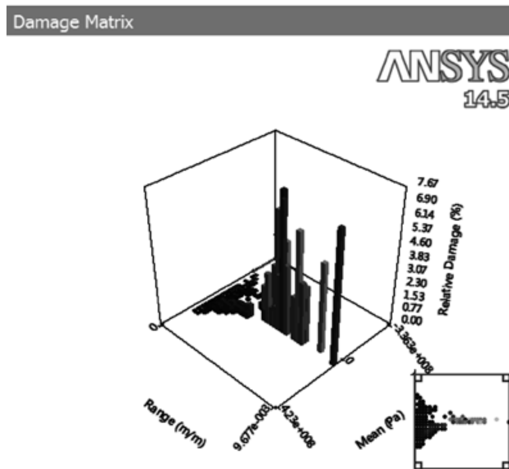


图 29-31　轴类零件损伤矩阵云图

第 30 例　带孔钢板的非比例加载疲劳分析



30.1　实例覆盖的知识点

读者通过学习该实例可以掌握如下 Workbench 的知识点。

1）多工况静力学分析的基本分析步骤。

2）非比例加载的疲劳计算的基本步骤。

3）查看模型的疲劳参数方法。

4）疲劳分析的基本设置方法。

5）疲劳分析查看结果的方法。

6）工况合并的方法。

30.2　模型

30.2.1 几何模型

图 30-1 所示为带孔钢板的三维模型，该钢板上制有一大一小两个孔。

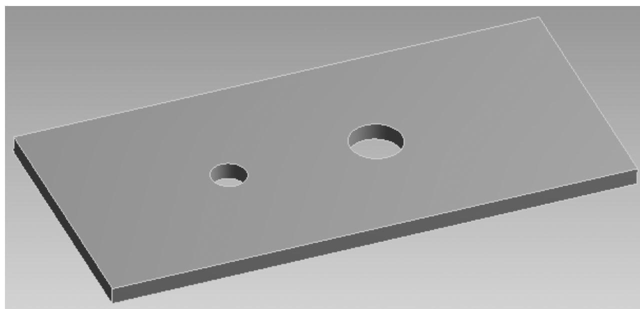


图 30-1　带孔钢板的三维模型

30.2.2 材料参数

假设带孔钢板的材料参数如下：弹性模量为 2.12E11，泊松比为 0.31。

30.2.3 边界条件和载荷

该实例模拟两种工况组合下的非比例疲劳问题，假设工况 1 的边界条件如下：完全固定约束靠近小孔的端面，在靠近大孔的端面施加一个单位拉力 1N；工况 2 的边界条件如下：完全固定约束靠近小孔的端面，在靠近打孔的端面施加一个单位弯矩为 1N·m，疲劳分析时工况 1 的工况系数为 1，工况 2 的工况系数为 1.5。

30.3 GUI 操作

30.3.1 创建静力学分析系统

启动 Workbench，双击 Workbench Toolbox 的“Static Structural”，弹出如图 30-2 所示的“静力学多工况分析系统”工程图。

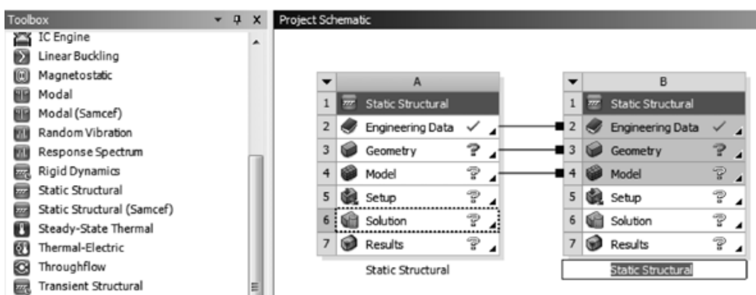


图 30-2 “静力学多工况分析系统”工程图

30.3.2 定义材料数据

单击静力学分析系统中的“Engineering Data”子模块，选择“Structural Steel”上的结构钢选项，弹出如图 30-3 所示的“结构钢材料”数据表，重新输入杨氏模量设置为“2.12E11”，泊松比为“0.31”，其他疲劳参数保持默认。

Properties of Outline Row 3: Structural Steel

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
5	Reference Temperature	22	C		
6	Isotropic Elasticity				
7	Derive from	Young's ...			
8	Young's Modulus	2.12E+11	Pa		
9	Poisson's Ratio	0.31			
10	Bulk Modulus	1.8596E+11	Pa		
11	Shear Modulus	8.0916E+10	Pa		
12	Alternating Stress Mean Stress	Tabular			
13	Interpolation	Log-Log			
14	Scale	1			

图 30-3 “结构钢材料”数据表

30.3.3 建立几何模型

如图 30-4 所示，右击静力学系统中的几何体选项，选择 Import Geometry→Browse，打开工作目录文件夹，选择带孔钢板模型文件，单击“OK”按钮。



图 30-4 导入模型

30.3.4 创建有限元模型

选择静力学分析系统中的“Modal”选项，进入静力学多工况分析系统，图 30-5 给出了“静力学多工况分析”流程图。

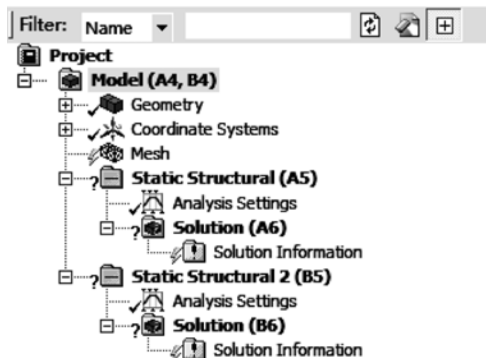


图 30-5 “静力学多工况分析”流程图

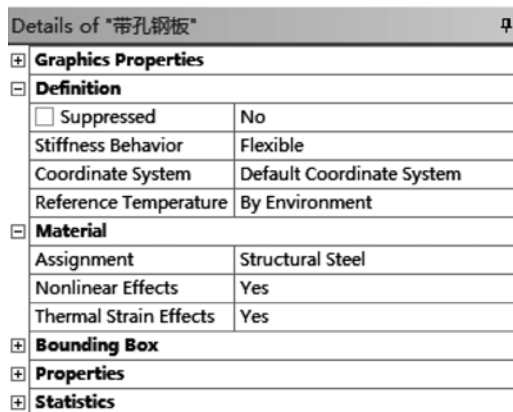
1．为带孔钢板赋予材料

单击 Model→Geometry→Part1，则弹出如图 30-6 所示的“带孔钢板材料细节”设置面板，用户一般只需设置该面板的两个子选项，即“Definition”和“Material”选项。在“Definition”选项中，用户可以设置模型的“Stiffness Behavior”“Coordinate System”和

“Reference Temperature”，在“Material”选项中可以为模型指定“Assignment”，本实例选用材料为“Structural Steel”。

2．网格划分

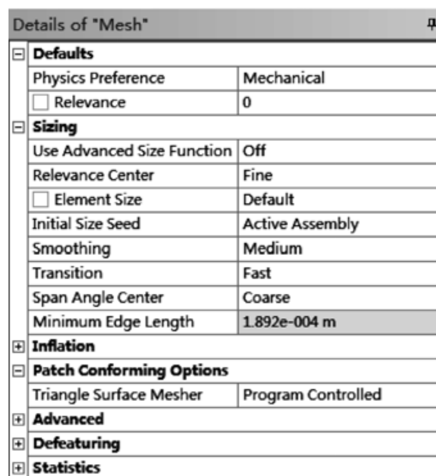
单击“Mesh”，弹出如图 30-7 所示的“网格划分细节”设置面板，设置“Relevance Center”为“Fine”，其他保持默认设置，然后右击“Mesh”，选择“Generate Mesh”。



Details of "带孔钢板"

Graphics Properties	
Definition	
Suppressed	No
Stiffness Behavior	Flexible
Coordinate System	Default Coordinate System
Reference Temperature	By Environment
Material	
Assignment	Structural Steel
Nonlinear Effects	Yes
Thermal Strain Effects	Yes
Bounding Box	
Properties	
Statistics	

图 30-6 “带孔钢板材料细节”设置面板



Details of "Mesh"

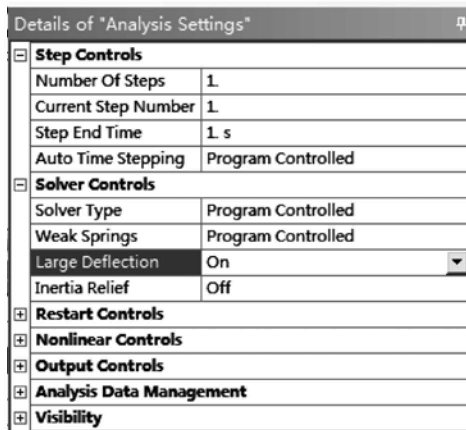
Defaults	
Physics Preference	Mechanical
Relevance	0
Sizing	
Use Advanced Size Function	Off
Relevance Center	Fine
Element Size	Default
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	Medium
Transition	Fast
Span Angle Center	Coarse
Minimum Edge Length	1.892e-004 m
Inflation	
Patch Conforming Options	
Triangle Surface Mesher	Program Controlled
Advanced	
Defeaturing	
Statistics	

图 30-7 “网格划分细节”设置面板

30.3.5 工况 1 静力学分析

1．静力学分析设置

单击“Static Structural”下方的“Analysis Settings”，则会出现如图 30-8 所示的“静力学求解分析细节”设置面板，设置“Large Deflection”为“On”，表明激活了大变形。



Details of "Analysis Settings"

Step Controls	
Number Of Steps	1.
Current Step Number	1.
Step End Time	1. s
Auto Time Stepping	Program Controlled
Solver Controls	
Solver Type	Program Controlled
Weak Springs	Program Controlled
Large Deflection	On
Inertia Relief	Off
Restart Controls	
Nonlinear Controls	
Output Controls	
Analysis Data Management	
Visibility	

图 30-8 “静力学分析细节”设置面板

2．施加固定约束

右击“Static Structural”，选择 Insert→Fixed Support，则在细节窗口出现如图 30-9 所示

的“固定约束细节”设置面板，选择发动机连杆中的下方小孔表面，单击“Apply”按钮。

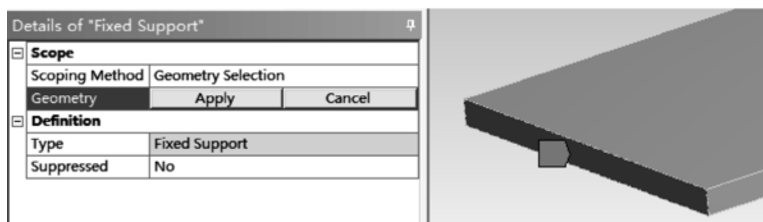


图 30-9　“固定约束细节”设置面板

3．施加拉力

右击“Static Structural”，选择 Insert→Force，则在细节窗口出现如图 30-10 所示的“施加力细节”设置面板，选择发动机连杆上方大半圆表面，单击“Apply”按钮，设置施加方式为“Components”，输入“Y Component”为“1”。

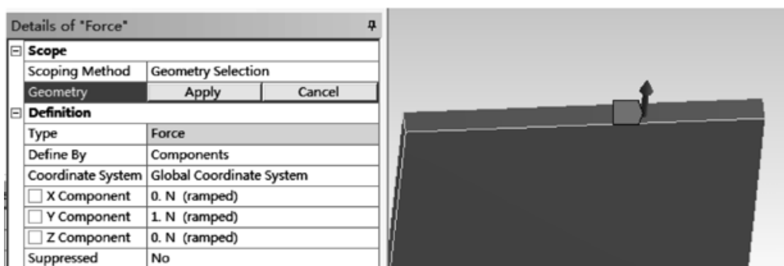


图 30-10　“施加力细节”设置面板

4．求解

选择 Static Structural→Solution，右击“Solution”，选择“Solve”。

5．观察结果

图 30-11 和图 30-12 分别给出了带孔钢板的总体变形云图和等效应力云图，具体查看方法读者可以参见本章的视频教程。

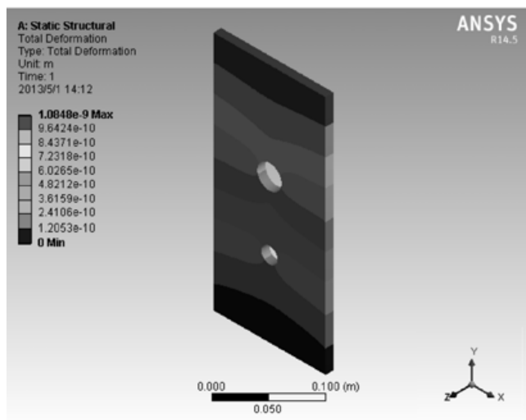


图 30-11　带孔钢板的总体变形云图

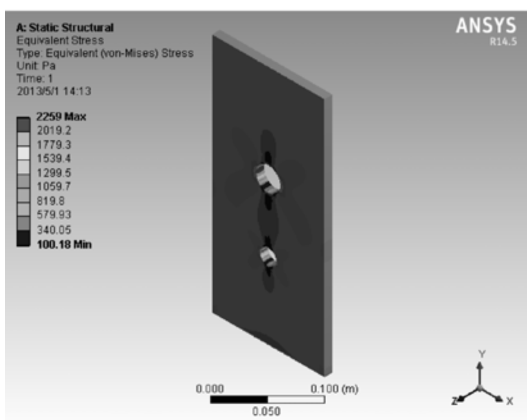


图 30-12　带孔钢板的等效应力云图



30.3.6 工况 2 静力学分析

1．静力学分析设置

单击“Static Structural 2”下方的“Analysis Settings”，则会出现如图 30-13 所示的“静力学求解分析细节”设置面板，设置“Large Deflection”为“On”，表明激活了大变形。

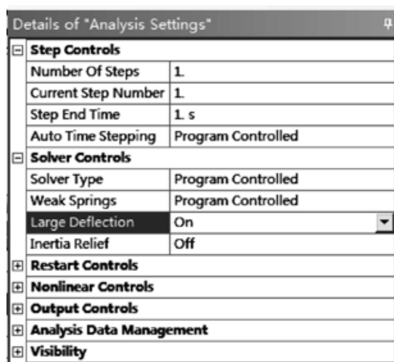


图 30-13 “静力学分析细节”设置面板

2．施加固定约束

右击“Static Structural”，选择 Insert→Fixed Support，则在细节窗口出现如图 30-14 所示的“固定约束细节”设置面板，选择发动机连杆中的下方小孔表面，单击“Apply”按钮。

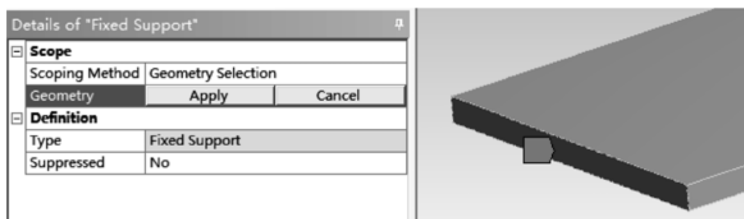


图 30-14 固定约束细节设置面板

3．施加弯矩

右击“Static Structural”，选择 Insert→Moment，则在细节窗口出现如图 30-15 所示的“施加弯矩细节”设置面板，选择带孔钢板的上端面，单击“Apply”按钮，设置施加方式为“Components”，输入“X Component”为“1”。

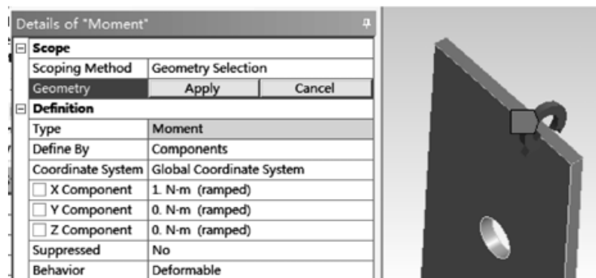


图 30-15 “施加弯矩细节”设置面板

4．求解

选择 Static Structural→Solution，右击“Solution”，选择“Solve”。

5．观察结果

图 30-16 和图 30-17 分别给出了带孔钢板的总体变形云图和等效应力云图，具体查看方法读者可以参见本章视频教程。

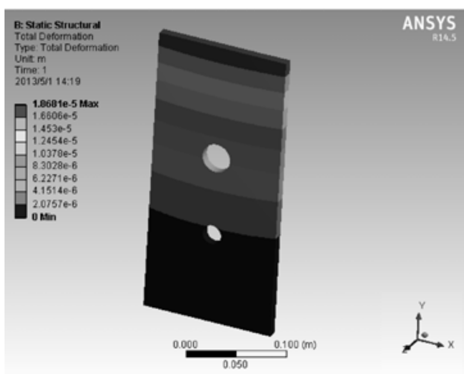


图 30-16 “带孔钢板的总体变形”云图

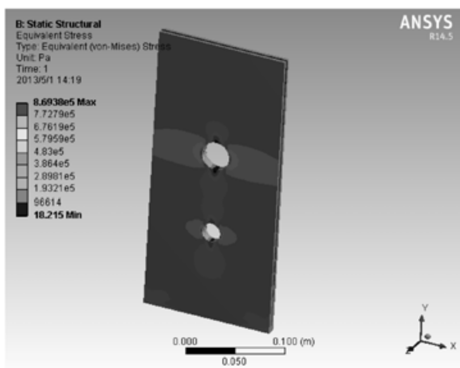


图 30-17 “带孔钢板的等效应力”云图

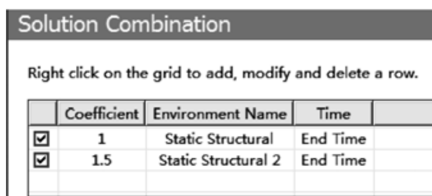
30.3.7 非比例加载疲劳分析

1．添加求解合并选项

右击“Model”，选择 Insert→Solution Combination，则在 Worksheet 出现求解合并设置选项，右击选择“Add”，添加求解环境为“Static Structural”，继续右击选择“Add”，添加求解环境为“Static Structural 2”，将“Static Structural 2”的前面系数设置为“1.5”，通过以上设置后出现如图 30-18 所示的“求解合并细节”设置面板。

2．插入疲劳分析工具

右击“Solution Combination”，选择 Insert→Fatigue→Fatigue Tool，则在细节窗口出现如图 30-19 所示的“疲劳工具细节”设置面板，设置疲劳强度系数为“0.8”，该系数用于修改疲劳试验与计算机模拟的差异可以考虑试件除了平均应力的其他影响。设置加载方式为“Non-Proportional”，“Scale Factor”为“3000”，表明将静力学的单位力放大 3000 倍，因为该实例为高周疲劳问题即在外载荷作用下模型没有发生塑性变形，因此设置“Analysis Type”为“Stress Life”，平均应力为“Goodman”，其他设置保持默认设置，图 30-20 给出了疲劳载荷变化示意图。

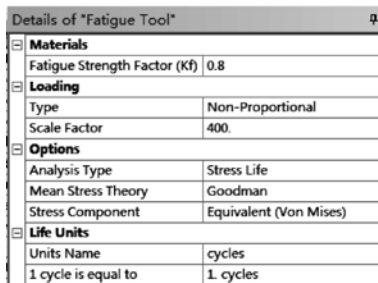


Solution Combination

Right click on the grid to add, modify and delete a row.

	Coefficient	Environment Name	Time
☑	1	Static Structural	End Time
☑	1.5	Static Structural 2	End Time

图 30-18 “求解合并细节”设置面板



Details of "Fatigue Tool"

Materials	
Fatigue Strength Factor (Kf)	0.8
Loading	
Type	Non-Proportional
Scale Factor	400.
Options	
Analysis Type	Stress Life
Mean Stress Theory	Goodman
Stress Component	Equivalent (Von Mises)
Life Units	
Units Name	cycles
1 cycle is equal to	1. cycles

图 30-19 “疲劳工具细节”设置面板

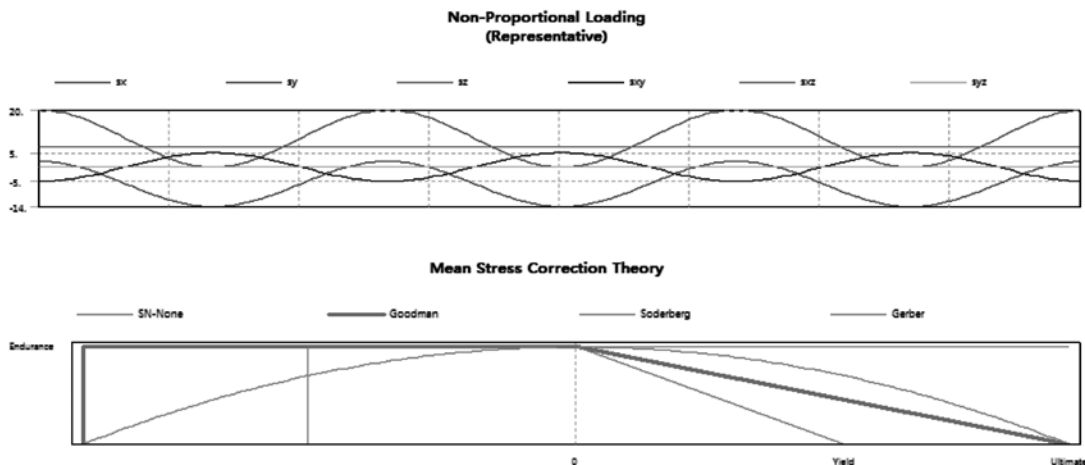


图 30-20 疲劳载荷变化示意图

3．设置疲劳计算项

（1）计算安全系数

右击“Fatigue Tool”，选择 Insert→Safety Factor，则在细节窗口出现如图 30-21 所示的“安全系数细节”设置面板，设置“Design Life”为“1E5 cycles”。

（2）双轴显示

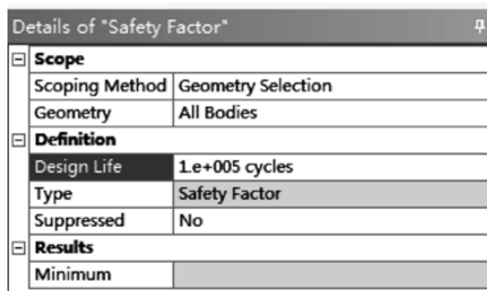
右击“Fatigue Tool”，选择 Insert→Biaxiality Indication。

（3）计算使用寿命

右击“Fatigue Tool”，选择 Insert→Biaxiality Indication。

（4）计算疲劳敏感度

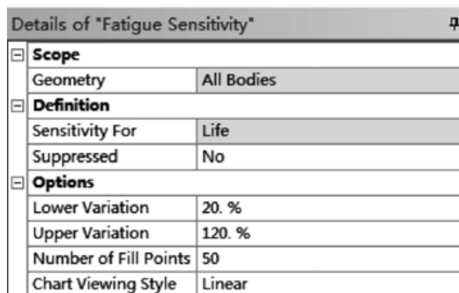
右击“Fatigue Tool”，选择 Insert→Fatigue Sensitivity，则在细节窗口出现如图 30-22 所示的“疲劳计算敏感度细节”设置面板，设置载荷的“Lower Variation”为“20%”，疲劳载荷的“Upper Variation”为“120%”，输入曲线的插值点为“50”，其他设置保持默认。



Details of "Safety Factor"

Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	All Bodies
Definition	
Design Life	1.e+005 cycles
Type	Safety Factor
Suppressed	No
Results	
Minimum	

图 30-21 “安全系数细节”设置面板



Details of "Fatigue Sensitivity"

Scope	
Geometry	All Bodies
Definition	
Sensitivity For	Life
Suppressed	No
Options	
Lower Variation	20. %
Upper Variation	120. %
Number of Fill Points	50
Chart Viewing Style	Linear

图 30-22 “疲劳敏感度细节”设置面板

4．开始疲劳计算

选择 Fatigue Tool→Solution，右击“Solution”，选择“Solve”。

5．查看结果

图 30-23～图 30-25 分别给出了带孔钢板的安全系数、使用寿命和双轴应力云图，图 30-26 给出了带孔钢板的疲劳分析敏感度曲线，具体的查看方法读者可以参见本章视频教程。

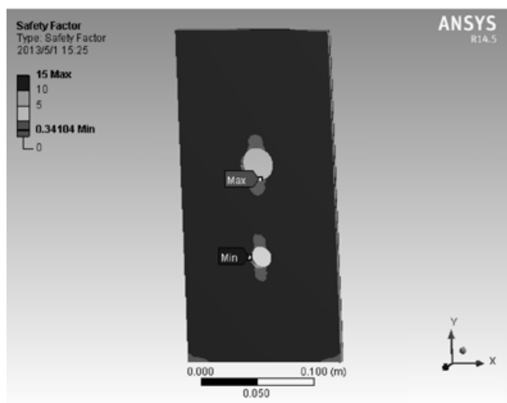


图 30-23　带孔钢板的安全系数云图

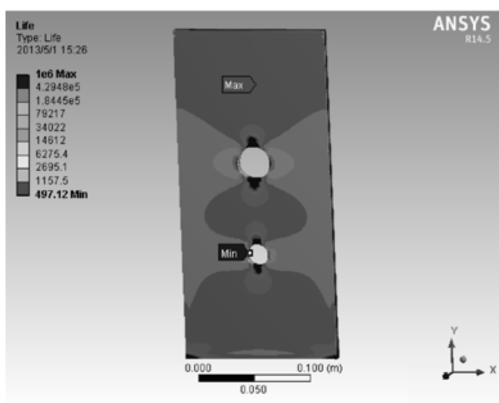


图 30-24　带孔钢板的使用寿命云图

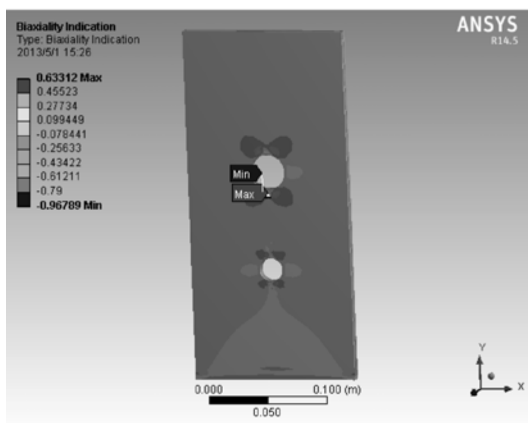


图 30-25　带孔钢板的双轴应力云图

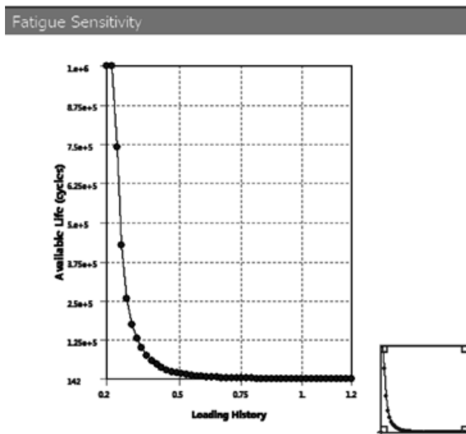


图 30-26　带孔钢板的疲劳分析敏感度曲线

第 31 例　风载作用于广告牌上的单向流–固耦合分析

31.1　实例覆盖的知识点

读者通过学习该实例可以掌握如下 Workbench 的知识点。

1）单向流-固耦合的基本流程。

2）建立流-固耦合分析模型的方法。

3）Fluent 分析的基本步骤。

4）将流体压力导入到结构分析的方法。

5）设置湍流模型的方法。

31.2　问题的描述

31.2.1 几何模型

如图 31-1 所示，风载作用于广告牌的单向流-固耦合分析模型由流场区域和固体区域组成，流体区域为空气，固体区域为广告牌。

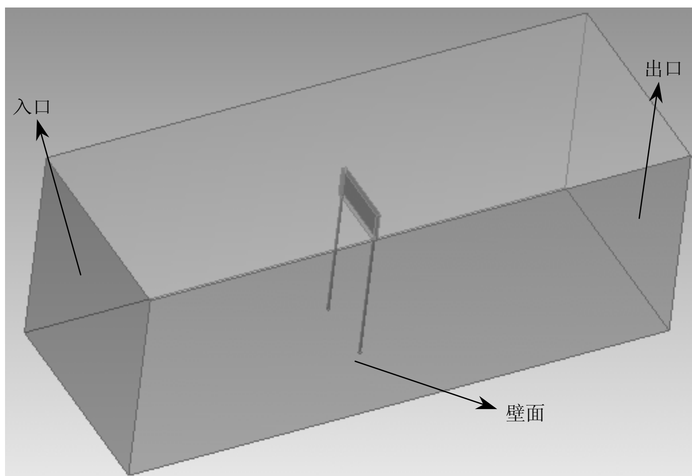


图 31-1　风载作用于广告牌的单向流-固耦合

31.2.2 固体材料参数

本实例假设广告牌的弹性模量为 2.12E11Pa，泊松比为 0.31。



31.2.3 边界条件和载荷

流场的入口空气速度为 40m/s，流场出口为压力出口背压为 0，地面为固定壁面条件。结构分析是完全约束广告牌立柱的底面，并将流场压力传递给广告牌。

31.3 GUI 操作

31.3.1 创建单向流固耦合分析系统

启动 Workbench，双击 Workbench Toolbox 的 Custom Systems→FSI:Fluid Flow（FLUENT）→Static Structural，弹出如图 31-2 所示的单向流-固耦合分析系统。

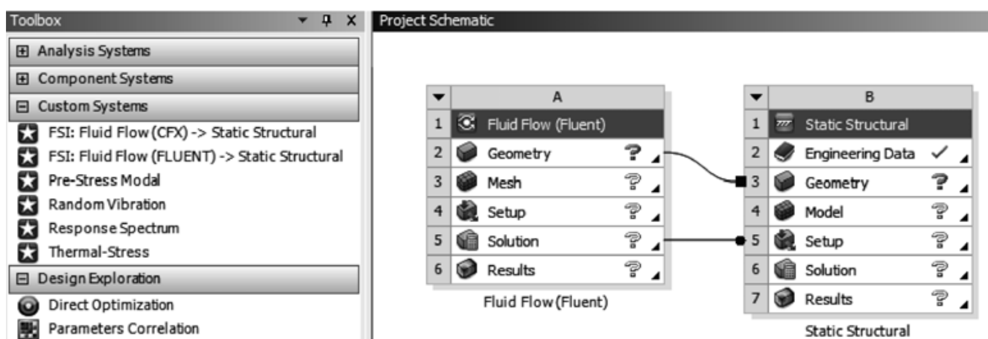


图 31-2　单向流-固耦合分析系统

31.3.2 建立几何模型

如图 31-3 所示，右击流体动力学分析系统中的几何体选项，选择 Import Geometry→Browse，打开工作目录文件夹，选择广告牌模型文件，单击“OK”按钮。

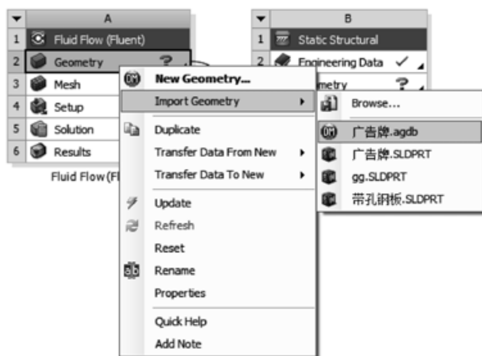


图 31-3　导入模型



31.3.3 划分流体区域网格

1．忽略固体区域

双击流体分析系统中的“Mesh”，弹出如图 31-4 所示的流体网格划分系统，因为进行流场计算，所以将广告牌忽略掉，操作如下：右击“Billboard”，选择“Suppress Body”，单击“Air region”，则在细节窗台出现如图 31-5 所示的“空气材料细节”设置面板，设置材料为“Fluid”。

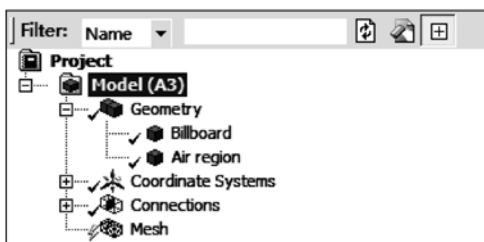


图 31-4　流体网格划分系统

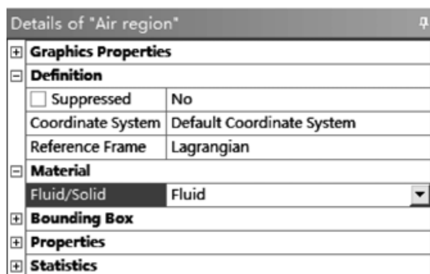


图 31-5　空气材料细节设置面板

2．为流体分析定义边界名称

这一步的操作用户可以参见本章的视频教程，将流体入口命名为“inlet”，流体出口为“outlet”，流体与固定的界面为“wall-fsi”，底面为“wall”，此外将流体区域的顶面和两个侧面命名为“inlet1”。

3．划分网格

单击“Mesh”，弹出如图 31-6 所示的“网格划分细节”设置面板，设置“Relevance Center”为“Coarse”，其他保持默认设置，然后右击“Mesh”，选择“Generate Mesh”。右击“Project Schematicz”中流体分析的“Mesh”，选择“Update”。

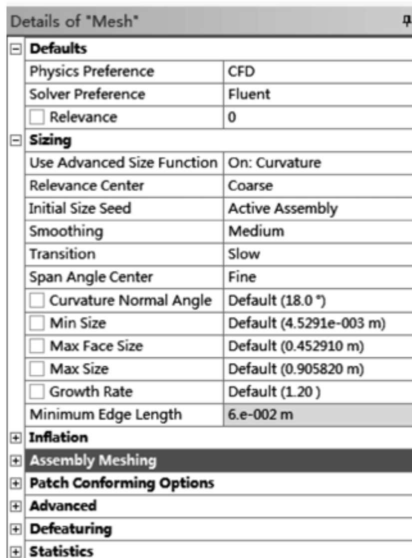


图 31-6　“网格划分细节”设置面板

31.3.4 流体分析

1．进入 Fluent

双击流体分析系统中的“Setup”，弹出如图 31-7 所示的“Fluent 启动”设置面板，设置“Processing Options”为“Parallel”，并设置处理器的数量为“4”，其他保持默认设置，单击“OK”按钮。

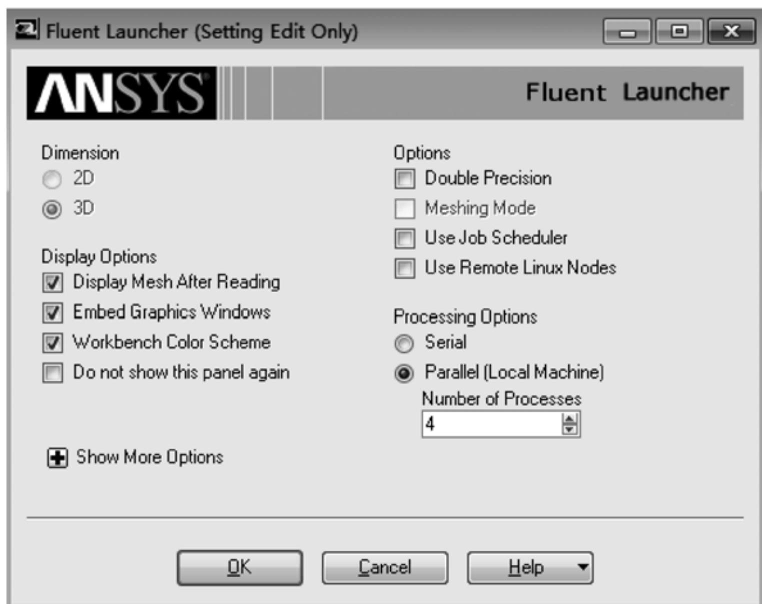


图 31-7 “Fluent 启动”设置面板

2．定义重力

GUI：General→Gravity，出现如图 31-8 所示的“流体重力加速度”设置面板，输入 Y 方向的重力加速度为“-9.8”。

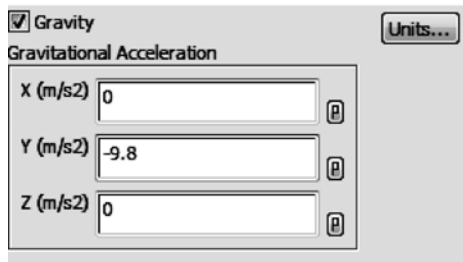


图 31-8 “流体重力加速度”设置面板

3．定义湍流模型

GUI：Models→Viscous-Laminar→Edit，弹出如图 31-9 所示的“流体粘性模型”设置面板，选择流体湍流模型为“k-epsilon(2 equ)”，其他保持默认设置，单击“OK”按钮。



图 31-9 “流体粘性模型”设置面板

4．定义流体材料模型

因为该实例使用的流体介质为空气，而 Fluent 默认的流体材料也是空气，因此这个步骤保持默认设置即可。

5．定义边界条件

（1）定义正面速度入口边界

GUI：Boundary Conditions→inlet→Edit，弹出如图 31-10 所示的“流体速度入口边界”设置面板，输入“Velocity”为“40”，“Turbulent Intensity”为“10”，“Turbulent Viscosity”为“10”。

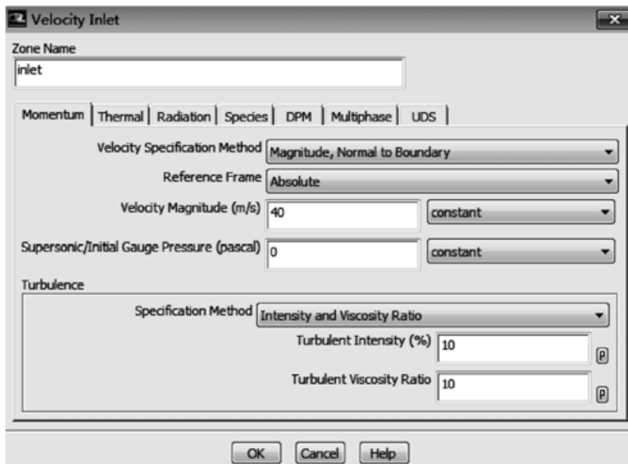


图 31-10 “流体速度入口边界”设置面板

（2）定义侧面速度入口边界

GUI：Boundary Conditions→inlet1→Edit，弹出如图 31-11 所示的“流体速度入口边界”设置面板，输入速度施加方法为“Components”，Z 方向速度为“40”，“Turbulent Intensity”为“10%”，“Turbulent Viscosity”为“10”。

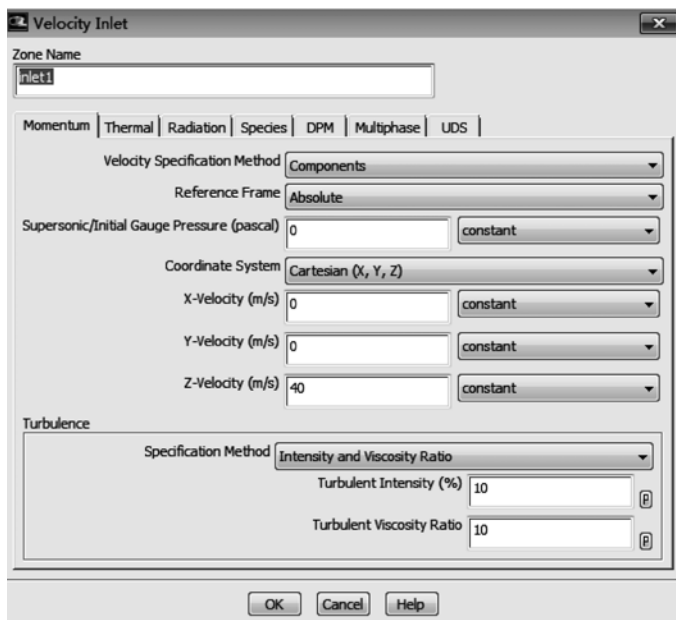


图 31-11 “流体速度入口边界”设置面板

（3）定义压力出口边界

GUI：Boundary Conditions→outlet→Edit，弹出如图 31-12 所示的“压力出口边界”设置面板，确保出口压力为“0”，单击“OK”按钮。

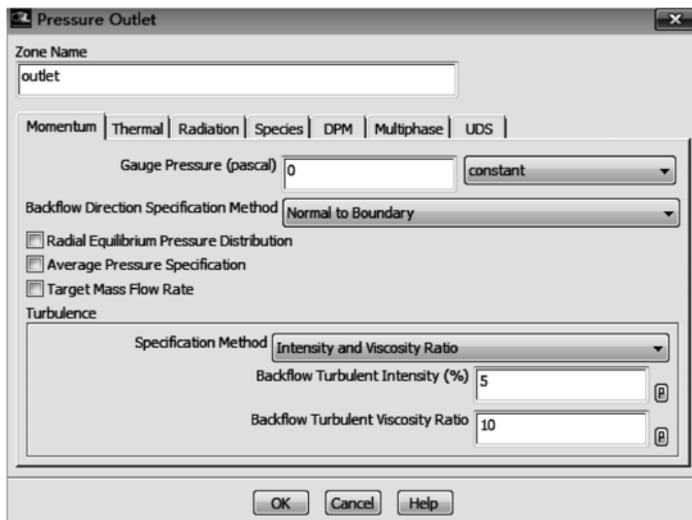


图 31-12 “压力出口边界”设置面板

6．初始化求解

单击“Solution Inibialization”按钮，则出现如图 31-13 所示的“求解初始化”设置面板，单击“Initializa”来获得初始流场。

7．求解流场

单击“Run Caculation”按钮，则出现如图 31-14 所示的“运行计算”设置面板，输入迭代次数为“50”，单击“Calculate”按钮开始计算。



图 31-13 “求解初始化”设置面板

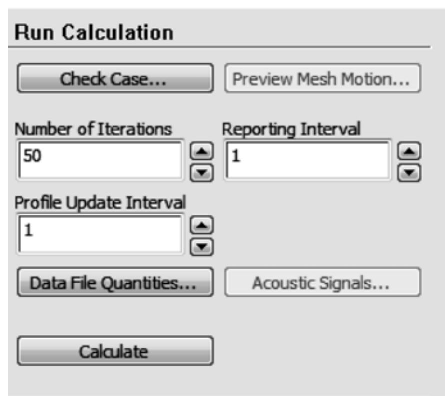


图 31-14 “运行计算”设置面板

8．观察结果

图 31-15 和图 31-16 分别给出了流体区域外表面的压力云图和广告牌面上的压力云图，具体查看方法读者可以参见本章视频教程。

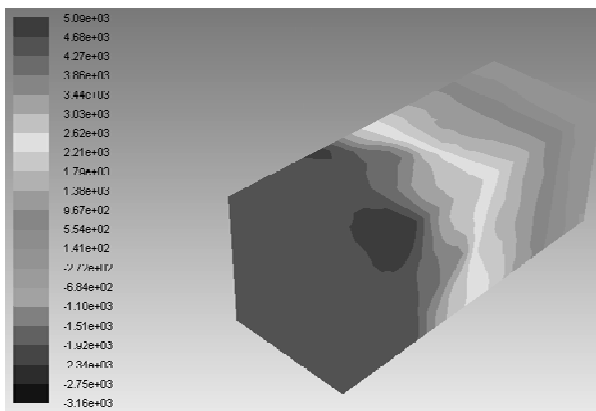


图 31-15　流体区域外表面的压力云图

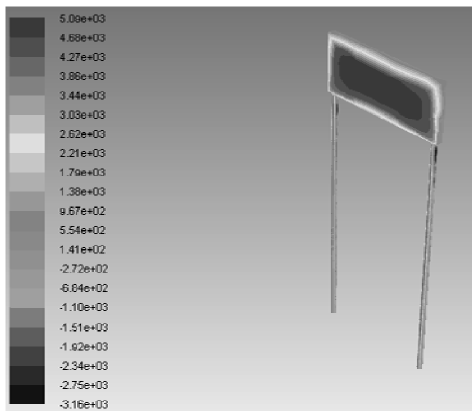


图 31-16　广告牌面上的压力云图

31.3.5 结构静力学分析

1．进入结构静力学分析系统

双击结构静力学分析系统中的“Model”，进入结构静力学分析系统的“静力学分析”流程图，如图 31-17 所示。

2．为广告牌赋予材料参数

（1）忽略流体区域

单击 Geometry→Air region，则在细节区域出现如图 31-18 所示的“空气区域材料细节”设置面板，设置“Suppressed”为“Yes”。

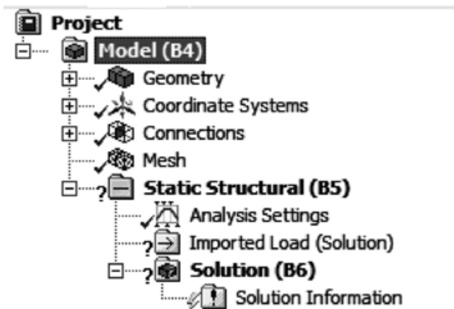


图 31-17 “静力学分析”流程图

Details of "Air region"

Graphics Properties	
Definition	
Suppressed	Yes
Stiffness Behavior	Flexible
Coordinate System	Default Coordinate System
Reference Temperature	By Environment
Material	
Assignment	Structural Steel
Nonlinear Effects	Yes
Thermal Strain Effects	Yes
Bounding Box	
Properties	
Statistics	

图 31-18 “空气区域材料细节”设置面板

（2）设置广告牌的材料

单击 Geometry→Billboard，则在细节区域出现如图 31-19 所示的“广告牌材料细节”设置面板，保持面板的默认设置，即把结构钢材料赋予广告牌。

3．划分结构网格

单击“Mesh”，弹出如图 31-20 所示的“网格划分细节”设置面板，设置“Relevance Center”为“Fine”，设置单元尺寸为“2E-2”，其他保持默认设置，然后右击“Mesh”，选择“Generate Mesh”。

Details of "Billboard"

Graphics Properties	
Definition	
Suppressed	No
Stiffness Behavior	Flexible
Coordinate System	Default Coordinate System
Reference Temperature	By Environment
Material	
Assignment	Structural Steel
Nonlinear Effects	Yes
Thermal Strain Effects	Yes
Bounding Box	
Properties	
Statistics	

图 31-19 “广告牌材料细节”设置面板

Details of "Mesh"

Defaults	
Physics Preference	Mechanical
Relevance	0
Sizing	
Use Advanced Size Function	Off
Relevance Center	Fine
Element Size	2.e-002 m
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	Medium
Transition	Fast
Span Angle Center	Coarse
Minimum Edge Length	6.e-002 m
Inflation	
Patch Conforming Options	
Triangle Surface Mesher	Program Controlled
Advanced	
Defeaturing	
Statistics	

图 31-20 “网格划分细节”设置面板



4．静力学分析设置

单击“Static Structural”下方的“Analysis Settings”，则会出现如图 31-21 所示的“静力学求解分析细节”设置面板，设置“Large Deflection”为“On”，表明激活了大变形。

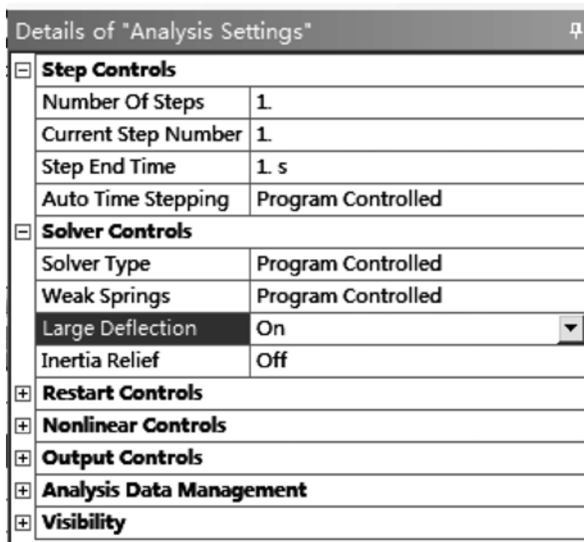


图 31-21　静力学分析细节设置面板

5．施加固定约束

右击“Static Structural”，选择 Insert→Fixed Support，则在细节窗口出现如图 31-22 所示的“固定约束细节”设置面板，选择广告牌柱子的底面，单击“Apply”按钮。

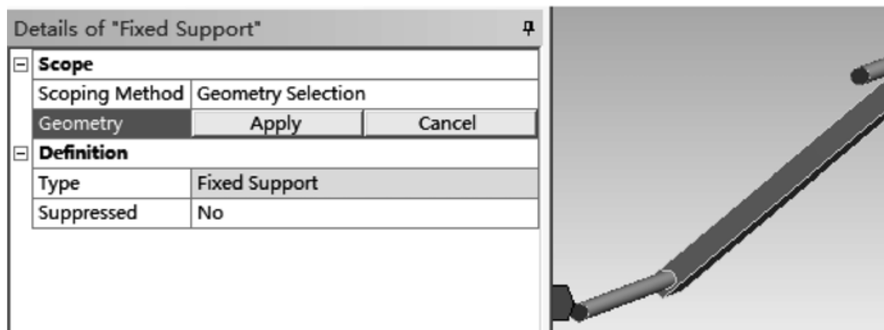


图 31-22　“固定约束细节”设置面板

6．导入流场压力到结构分析

右击“Impoted Load”，选择 Insert→Pressure，则在细节窗口出现如图 31-23 所示的“导入流体压力细节”设置面板，选择广告牌的外表面，单击“Apply”按钮，选择“CFD Surface”为“wall fsi”，然后右击“Imported Pressure”，选择“Import Load”。

7．求解

选择 Static Structural→Solution，右击“Solution”，选择“Solve”。

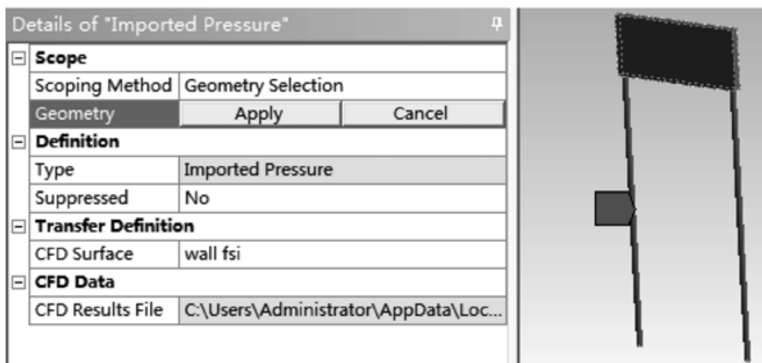


图 31-23 “导入流体压力细节”设置面板

8．观察结果

图 31-24 给出了流场导入结构场的压力云图，图 31-25～图 31-27 给出了广告牌的总体位移、等效应力和最大主应力云图，具体查看方法读者可以参见本章的视频教程。

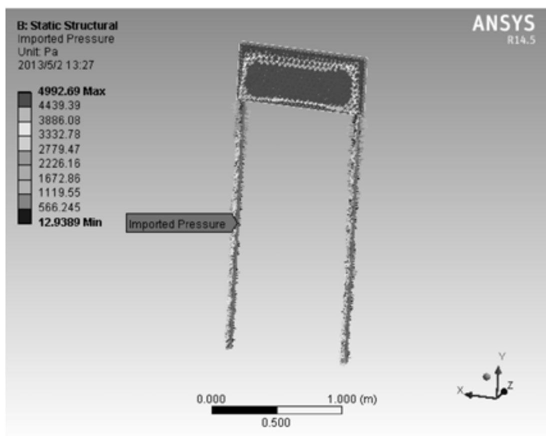


图 31-24 流场导入结构场的压力云图

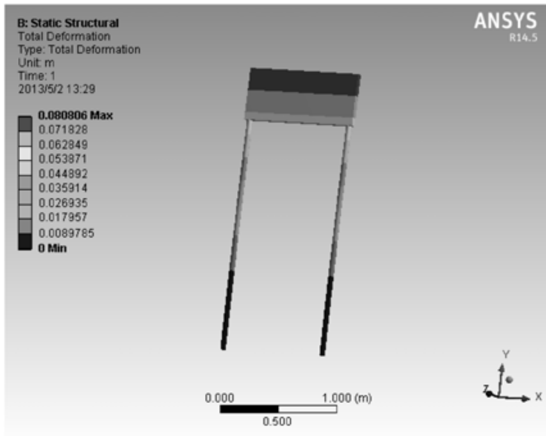


图 31-25 广告牌的总体位移云图

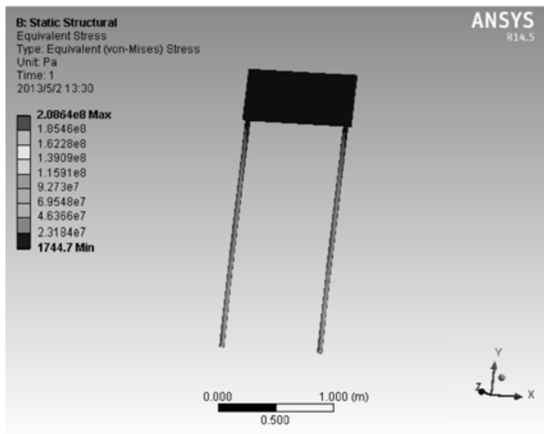


图 31-26 广告牌的等效应力云图

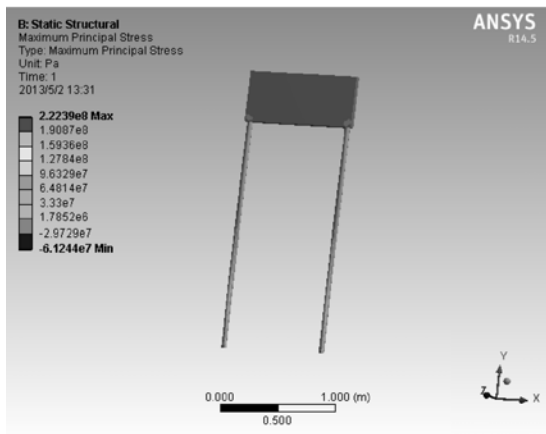


图 31-27 广告牌的最大主应力云图

第 32 例　振动橡胶板的双向流-固耦合（CFX）

32.1　实例覆盖的知识点

读者通过学习该实例可以掌握如下 Workbench 的知识点。

1）双向流-固耦合的基本流程。

2）建立流-固耦合分析模型的方法。

3）激活橡胶超弹材料模型的方法。

4）瞬态结构动力学分析步骤。

5）瞬态流体动力学分析步骤。

32.2　问题的描述

32.2.1　几何模型

图 32-1 给出了振动橡胶板双向流-固耦合分析模型，该模型主要由橡胶板和空气区域流场组成。

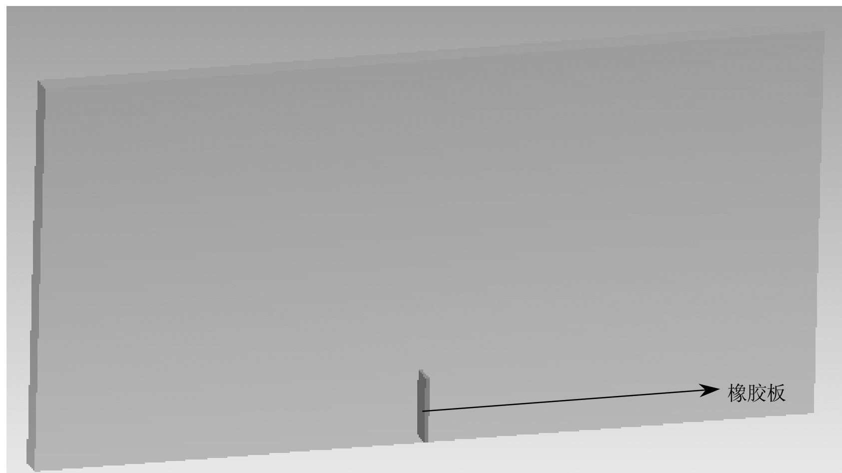


图 32-1　振动橡胶板双向流-固耦合分析

32.2.2 材料参数

本实例假设橡胶板符合应力-应变符合双参数 Mooney-Rivlin 模型计算，C_{10} = 0.52MPa，C_{01} = 0.13MPa，d =0，流场中的介质为空气，数据使用 CFX 中 25℃的空气数据。

32.2.3 边界条件和载荷

结构的边界为固定橡胶板底面，在橡胶板的一个面上线性施加一个压力，在 0.48s 时刻达到最大值为 350Pa，然后突然撤去压力，总体计算时间为 1.6s。

32.3 GUI 操作

32.3.1 创建双向流-固耦合分析系统

启动 Workbench，双击“Toolbox”中的“Transient Structural”，然后右击瞬态结构动力学分析中的“Setup”选择 Transfer Data To New→Fluid Flow(CFX)，因为双向流-固耦合分析结果都使用流体后处理器进行查看，所以可以把瞬态结构动力学中的“Solution”和“Results”都删除，最后弹出如图 32-2 所示的双向流-固耦合分析系统。

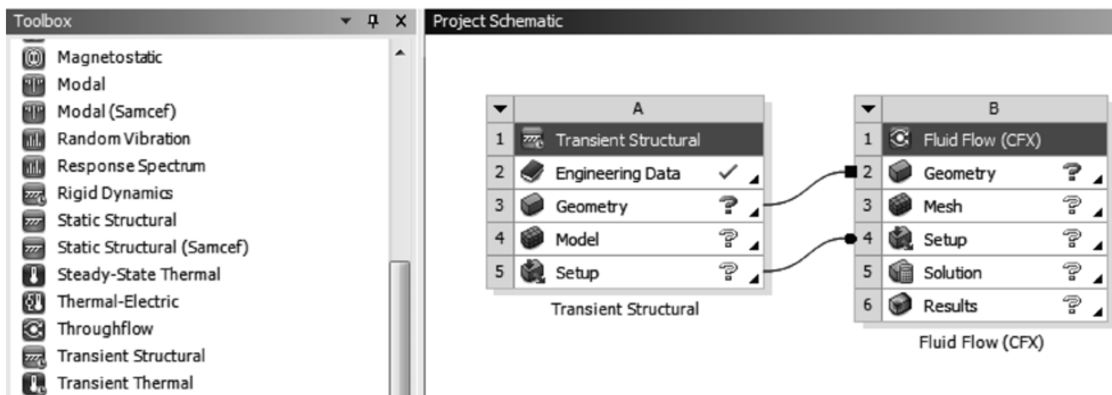


图 32-2 双向流-固耦合分析系统

32.3.2 定义材料数据

单击静力学分析系统中的“Engineering Data”子模块，在“Structural Stell”下方输入“rubber plate”，选择 Toolbox→Physical Properties，双击“Density”，选择 Toolbox→Hyperalastic，双击“Mooney-Rivlin 2 Parameters”，则出现如图 32-3 所示的“橡胶板材料参数输入”设置面板，橡胶密度为“1100”，输入“C10”为“5.2E5”，“C01”为“1.3E5”，“D1”为“0”，图 32-4 给出了该参数对应的橡胶板应力-应变关系，然后单击“Update Project”，最后单击“Return to Project”按钮。

Properties of Outline Row 3: plate

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Density	1100	kg m^-3		
3	Mooney-Rivlin 2 Parameter				
4	Material Constant C10	5.2E+05	Pa		
5	Material Constant C01	1.3E+05	Pa		
6	Incompressibility Parameter D1	0	Pa^-1		

图 32-3 “橡胶板材料参数输入”设置面板

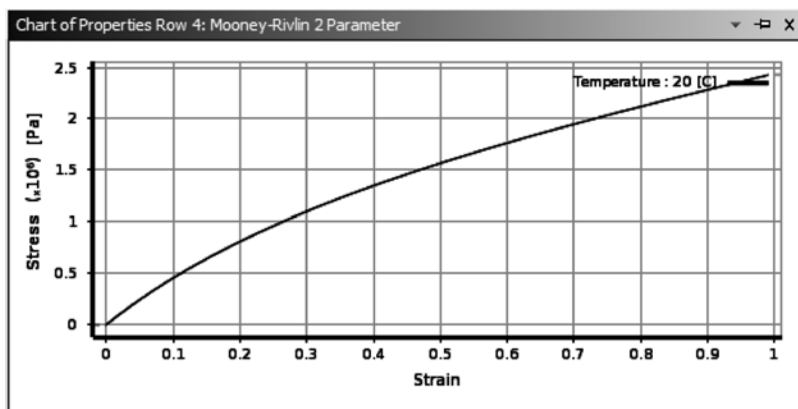


图 32-4 橡胶板应力-应变关系

32.3.3 建立几何模型

如图 32-5 所示，右击瞬态结构动力学分析系统中的几何体选项，选择 Import Gemoetry →Browse，打开工作目录文件夹，选择橡胶板模型文件，单击“OK”按钮。

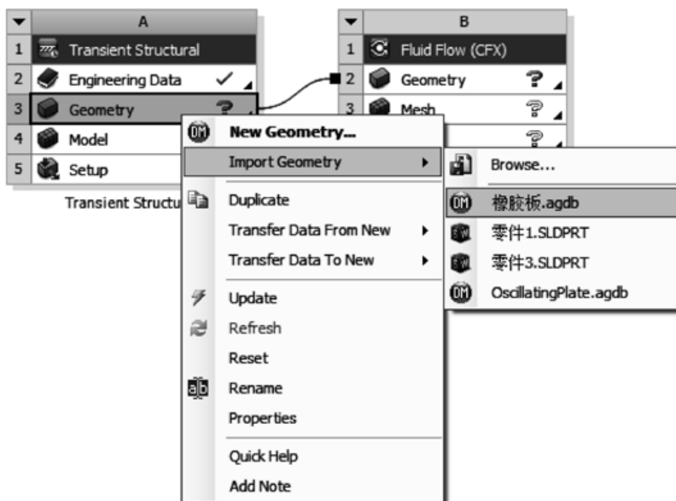


图 32-5 导入模型

32.3.4 设置瞬态结构动力学

单击瞬态结构动力学分析系统中的“Modal”选项，进入瞬态结构动力学系统，图 32-6 给出了“瞬态结构动力学分析”流程图。

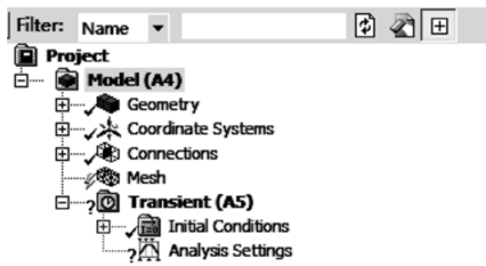


图 32-6 “瞬态结构动力学分析”流程图

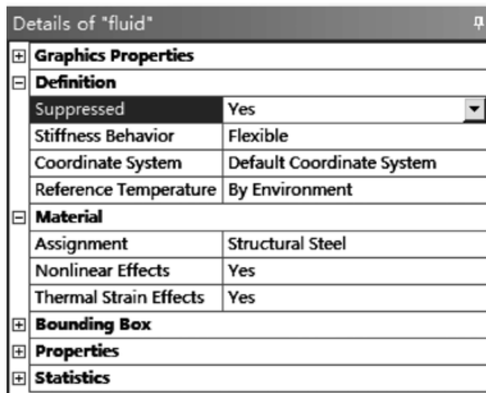
1．为橡胶板赋予材料参数

（1）忽略流场区域

单击 Geometry→fluid，则在细节区域出现如图 32-7 所示的“流场区域材料细节”设置面板，设置“Suppressed”为“Yes”。

（2）设置橡胶板的材料

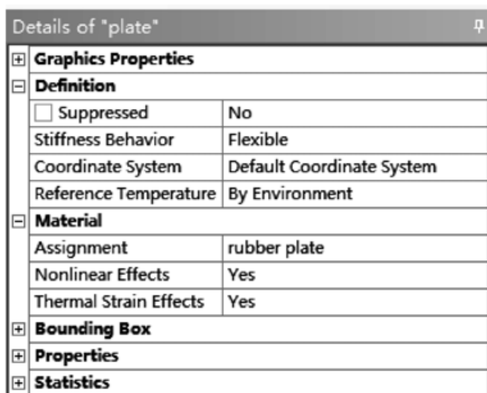
单击 Geometry→plate，则在细节区域出现如图 32-8 所示的“橡胶板区域材料细节”设置面板，在材料选项中可以为模型指定“Assignment”，本实例选用材料为“rubber plate”。



Details of "fluid"

Graphics Properties	
Definition	
Suppressed	Yes
Stiffness Behavior	Flexible
Coordinate System	Default Coordinate System
Reference Temperature	By Environment
Material	
Assignment	Structural Steel
Nonlinear Effects	Yes
Thermal Strain Effects	Yes
Bounding Box	
Properties	
Statistics	

图 32-7 “流场区域材料细节”设置面板



Details of "plate"

Graphics Properties	
Definition	
Suppressed	No
Stiffness Behavior	Flexible
Coordinate System	Default Coordinate System
Reference Temperature	By Environment
Material	
Assignment	rubber plate
Nonlinear Effects	Yes
Thermal Strain Effects	Yes
Bounding Box	
Properties	
Statistics	

图 32-8 “橡胶板材料细节”设置面板

2．划分结构网格

单击“Mesh”，弹出如图 32-9 所示的“网格划分细节”设置面板，设置“Relevance Center”为“Medium”，其他保持默认设置，然后右击“Mesh”，选择“Generate Mesh”。

3．瞬态动力学基本设置

单击“Transient”下方的“Analysis Settings”，则在细节窗口出现如图 32-10 所示的“瞬态结构动力学”设置面板，设置计算结束时间为“1.6s”。关闭自动时间步，计算的时间步长为“0.02s”。

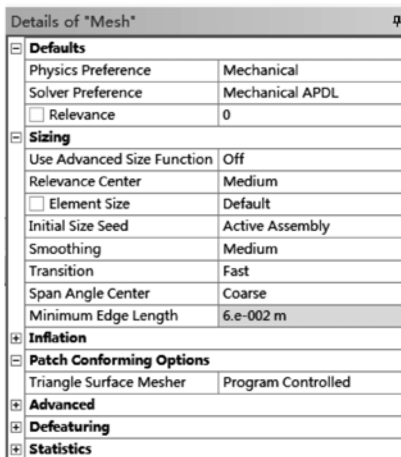


图 32-9 “网格划分细节”设置面板

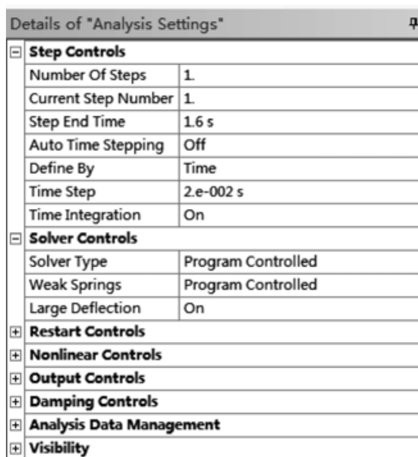


图 32-10 “瞬态结构动力学”设置面板

4．完全固定约束橡胶板底面

右击“Transient”，选择 Insert→Fixed Support，则在细节窗口出现如图 32-11 所示的“固定约束细节”设置面板，选择橡胶板的底面，单击“Apply”按钮。

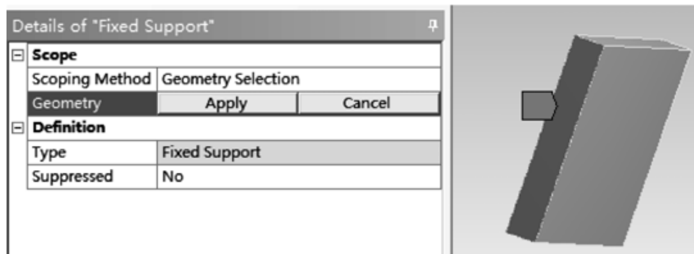


图 32-11 “固定约束细节”设置面板

5．施加压力

右击“Transient”，选择 Insert→Pressure，则在细节窗口出现如图 32-12 所示的“压力细节”设置面板，选择橡胶板的一个侧面，单击“Apply”按钮，设置“Magnitude”为“表格”，图 32-13 给出了压力随时间变化的表格，按照图 32-13 进行输入数据。

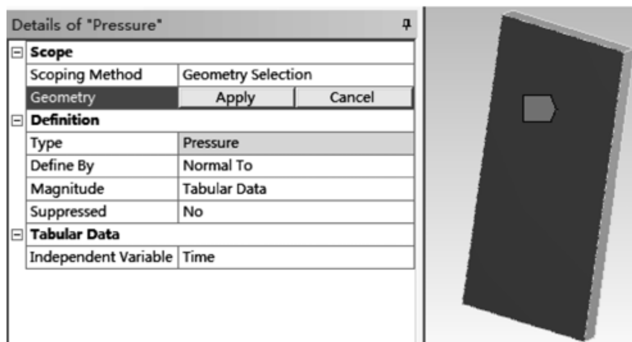


图 32-12 “压力细节”设置面板

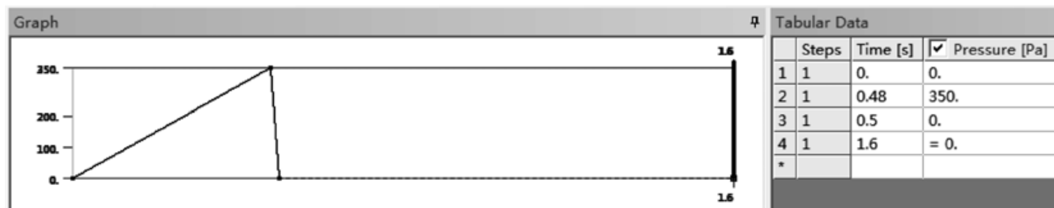


图 32-13　压力与时间的关系曲线

6．设置流固耦合界面

与单向流-固耦合不同，双向流-固耦合分析不是直接导入流体计算结果，而是通过预先设定一个流固耦合界面，在计算中使用该界面实时的传递和接收数据。

右击“Transient”，选择 Insert→Fluid Solid Interface，则在细节窗口出现如图 32-14 所示“流-固耦合界面细节”设置面板，选择除橡胶板的底面和侧面的其他 3 个面，单击“Apply”按钮，其他设置保持默认。

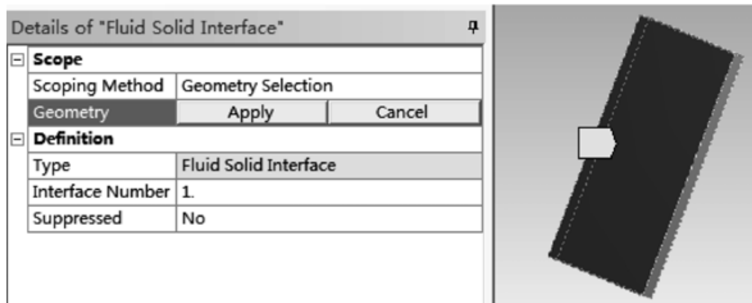


图 32-14　“流-固耦合界面细节”设置面板

回到“Project Schematic”，右击瞬态结构动力学分析系统中的“Setup”，选择“Update”，单击“Save”按钮，弹出“保存文件”对话框，输入保存工程的文件名为“sxoh”，单击“保存”按钮。

32.3.5 设置流体动力学

1．划分流体区域网格

（1）忽略橡胶板

双击“Fluid Flow（CFX）”中的“Mesh”，进入流体网格划分系统，展开 Geometry→Plate，单击“Plate”，则在细节窗口出现如图 32-15 所示的“橡胶板材料细节”设置面板，设置“Suppressed”。

（2）划分流体区域网格

单击“Mesh”，弹出如图 32-16 所示的“网格划分细节”设置面板，设置“Relevance Center”为“Medium”，“Use Advanced Size Function”为“On：Proximity”，其他保持默认设置，然后右击“Mesh”，选择“Generate Mesh”。

（3）为流体计算设置边界名

该步的操作可以参见本章视频教程，在该步中将两侧的对称面分别命名为“sym1”和

“sym2”，将与橡胶板的交接面命名为“interface”。

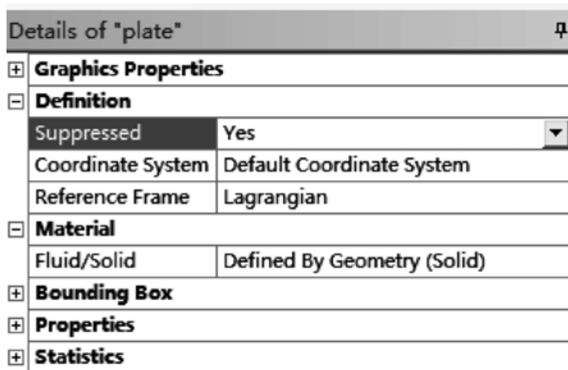


图 32-15 “橡胶板材料细节”设置面板

（4）更新流体网格

回到“Project Schematic”，右击流体分析系统中的“Setup”，选择“Update”。

2．CFX 前处理

（1）进入 CFX 前处理器

双击流体分析系统中的“Setup”，则进入如图 32-17 所示的 CFX 前处理分析系统。

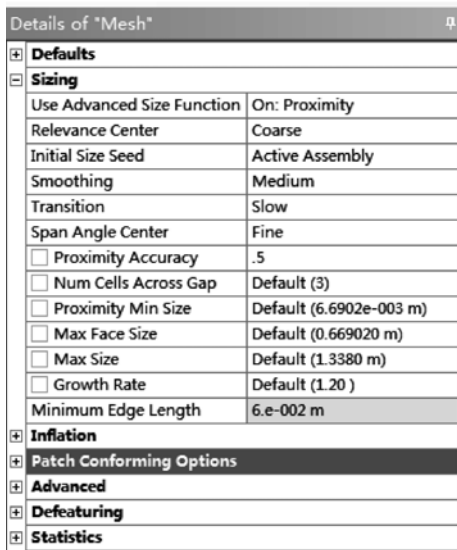


图 32-16 “网格划分细节”设置面板

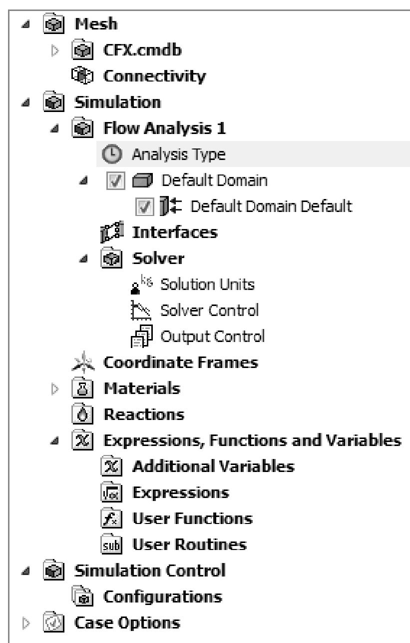


图 32-17 CFX 前处理分析系统

（2）设置分析类型

双击前处理分析系统中的“Analysis Type”，按照表 32-1 所示进行设置，设置完毕后单击“OK”按钮。

表 32-1 分析类型参数设置

标　　签	设 置 路 径	设 置 选 项
Basic Setttings	External Solver Coupling > Option	ANSYS MultiField
	Coupling Time Control > Coupling Time Duration > Option	Total Time
	Coupling Time Control > Coupling Time Duration > Total Time	1.6[s]
	Coupling Time Control > Coupling Time Steps > Option	Timesteps
	Coupling Time Control > Coupling Time Steps > Timesteps	0.02[s]
	Analysis Type > Option	Transient
	Analysis Type > Time Duration > Option	CouplingTime Duration
	Analysis Type > Time Steps > Option	Coupling Timesteps
	Analysis Type > Initial Time > Option	Coupling Initial Time

（3）为流体区域赋予材料

双击前处理器分析系统中的“Default Domain”，按照表 32-2 所示进行设置，设置完毕后单击“OK”按钮。

表 32-2 流场区域的参数设置

标　　签	设 置 路 径	设 置 选 项
Basic Settings	Fluid and Particle Definitions	Fluid 1
	Fluid and Particle Definitions→Fluid 1→Materia	Air at 25C
	Domain Models→Pressure→Reference Pressure	1[atm]
	Domain Models→Mesh Deformation→Option	Regions of Motion Specified
Fluid Models	Heat Transfer→Option	None
	Turbulence→Option	k-Epsilon

（4）定义对称面 1 边界条件

单击，然后单击“OK”按钮，按照表 32-3 所示进行设置，设置完毕后单击“OK”按钮。

表 32-3 对称面参数设置

标　　签	设 置 路 径	设 置 选 项
Basic Settings	Boundary Type	Symmetry
	Location	Sym1

（5）定义对称面 2 边界条件

单击，然后单击“OK”按钮，按照表 32-4 所示进行设置，设置完毕后单击“OK”按钮。

表 32-4 对称面参数设置

标　　签	设 置 路 径	设 置 选 项
Basic Settings	Boundary Type	Symmetry
	Location	Sym2

（6）定义流-固耦合界面边界条件

单击，然后单击“OK”按钮，按照表 32-5 所示进行设置，设置完毕后单击“OK”按钮。

表 32-5　流-固耦合界面参数设置

标　签	设 置 路 径	设 置 选 项
Basic Settings	Boundary Type	Wall
	Location	interface
Boundary Details	Mesh Motion→Option	ANSYS MultiField
	Mesh Motion→Receive From ANSYS	Total Mesh Displacement
	Mesh Motion→ANSYS Interface	FSIN_1
	Mesh Motion→Send to ANSYS	Total Force

（7）设置计算初始值

单击，然后按照表 32-6 所示进行设置，设置完毕后单击“OK”按钮。

表 32-6　计算初始值设置

标　签	设 置 路 径	设 置 选 项
Global Settings	Initial Conditions→Cartesian Velocity Components→U	0 [m s^-1]
	nitial Conditions→Cartesian Velocity Components→V	0 [m s^-1]
	Initial Conditions→Cartesian Velocity Components→W	0 [m s^-1]
	Initial Conditions→Static Pressure→Relative Pressure	0

（8）设置求解控制

单击“Solver Control”，然后按照表 32-7 所示进行设置，设置完毕后单击“OK”按钮。

表 32-7　求解控制参数设置

标　签	设 置 路 径	设 置 选 项
Basic Settings	Transient Scheme→Option	Second Order Backward Euler
	Convergence Control→Max. Coeff. Loops	3
External Coupling	Coupling Step Control→Solution Sequence Control→Solve ANSYS Fields	Before CFX Fields
	Coupling Data Transfer Control→Ansys Variable→FZ→Convergence Target→Convergence Target	1
	Coupling Data Transfer Control→Ansys Variable→UZ→Convergence Target→Convergence Target	1

（9）设置输出控制

单击 Output Control→Trn Results 后再单击，使用程序生成的默认文件名称，单击“OK”按钮，设置“Output Frequency”下的“Option”为“Every Timestep”。

3．CFX 求解

双击“Project Schematio”中流体动力学分析系统中的“Solution”，进入 CFX 求解器并弹出如图 32-18 所示的 CFX 运行求解设置面板，设置“Run Mode”为“Platform MPI Local Parallel”，并输入处理器的数量为“4”，单击“Start Run”开始计算，大约经过 40min 计算完成。图 32-19～图 32-22 分别给出了流-固计算中的 4 个计算收敛残差图。



图 32-18　CFX 运行求解设置面板

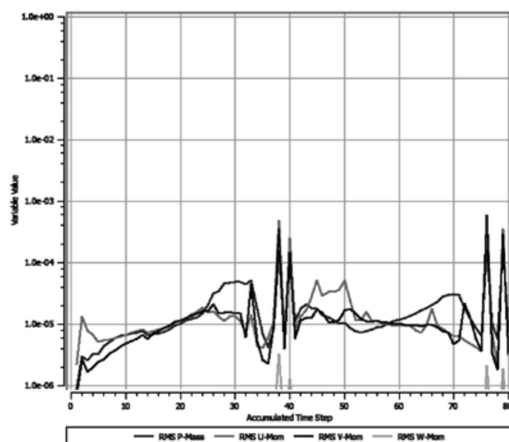


图 32-19　流-固计算中流场的残差迭代曲线

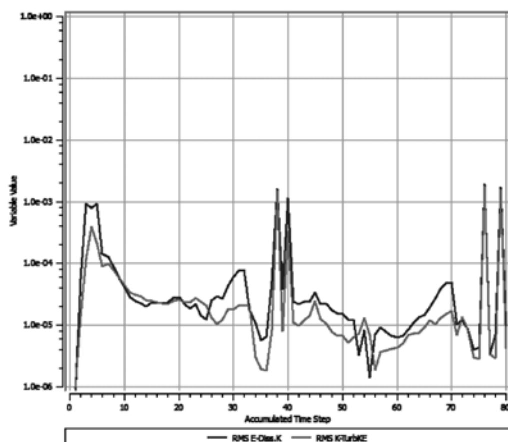


图 32-20　流-固计算中湍流参数残差迭代曲线

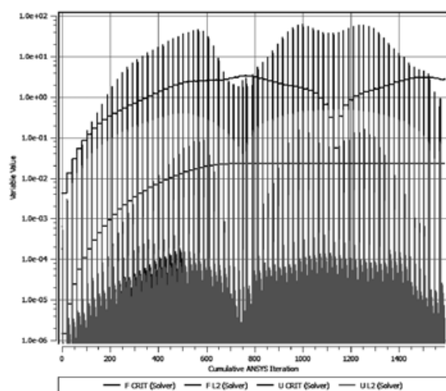


图 32-21　流-固计算中结构计算的收敛曲线

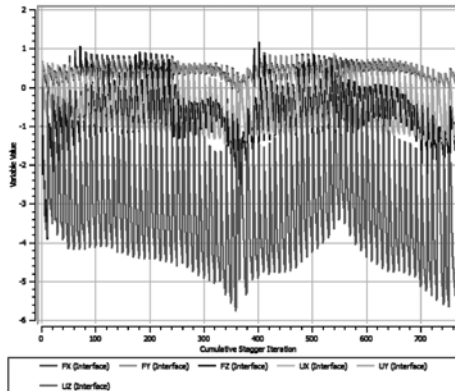


图 32-22　流-固计算中流场与结构场交界面收敛曲线

4．CFX 后处理

图 32-23～图 32-28 分别给出了橡胶板不同时刻的等效应力云图，图 32-29 和图 32-30 分别给出了不时刻的流场压力云图，具体的查看方法读者可以参见本章视频教程。

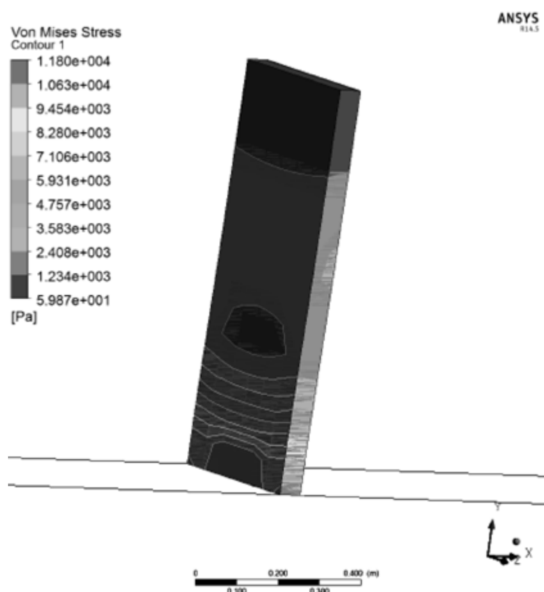


图 32-23　0.2s 时刻橡胶板的等效应力云图

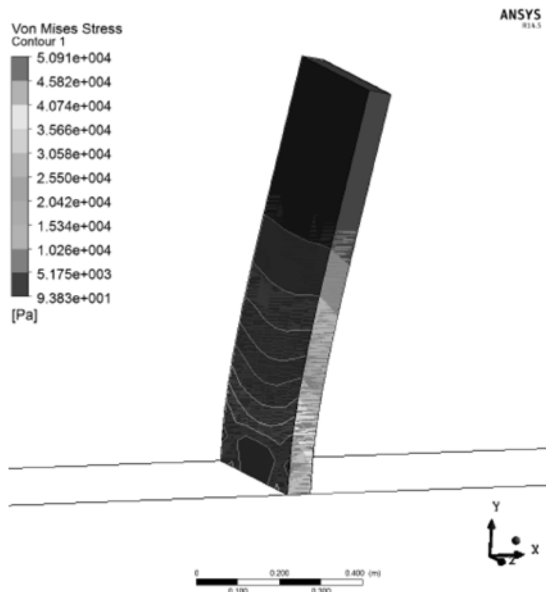


图 32-24　0.4s 时刻橡胶板的等效应力云图

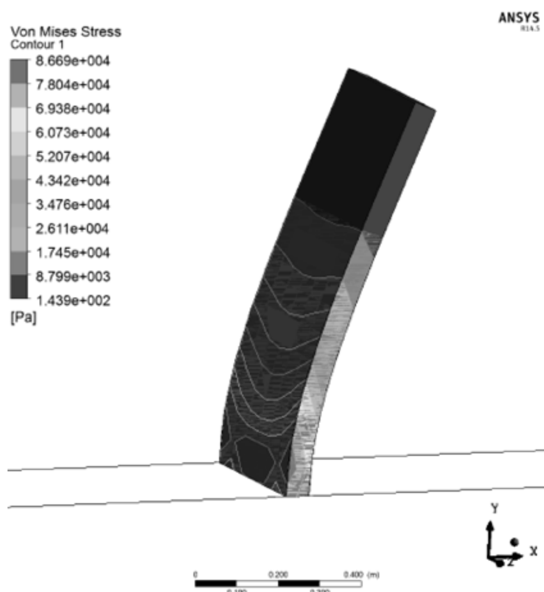


图 32-25　0.5s 时刻橡胶板的等效应力云图

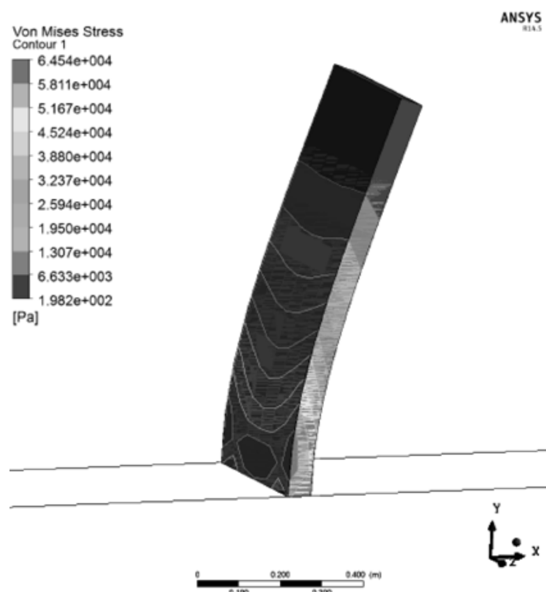


图 32-26　1s 时刻橡胶板的等效应力云图

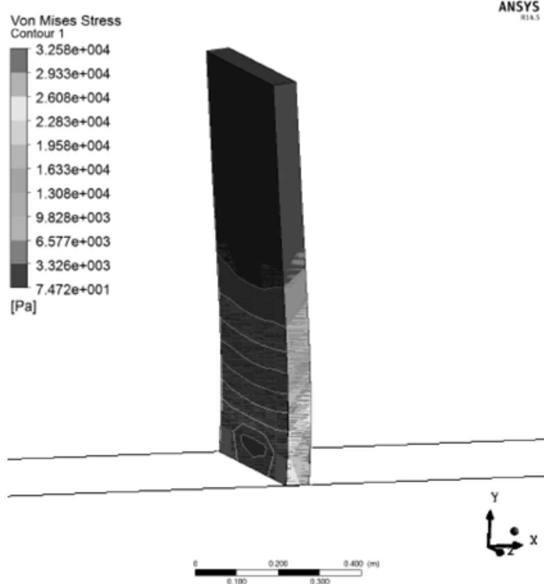


图 32-27　1.2s 时刻橡胶板的等效应力云图

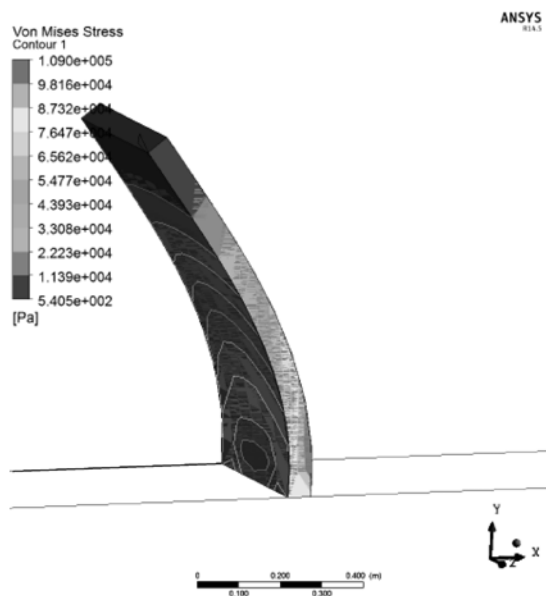


图 32-28　1.6s 时刻橡胶板的等效应力云图

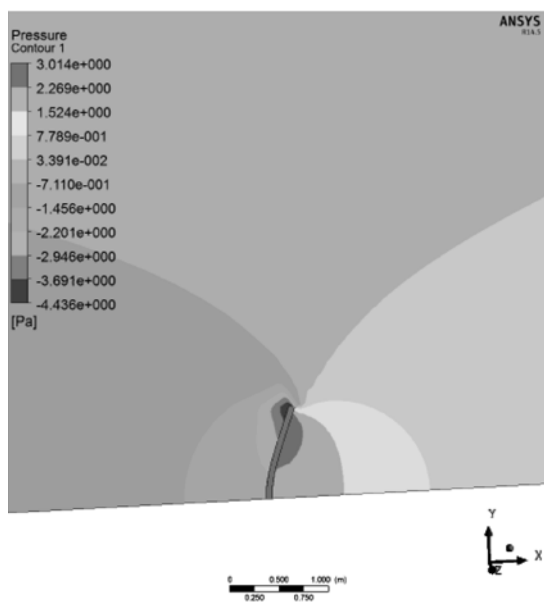


图 32-29　0.48s 时刻流场的压力云图

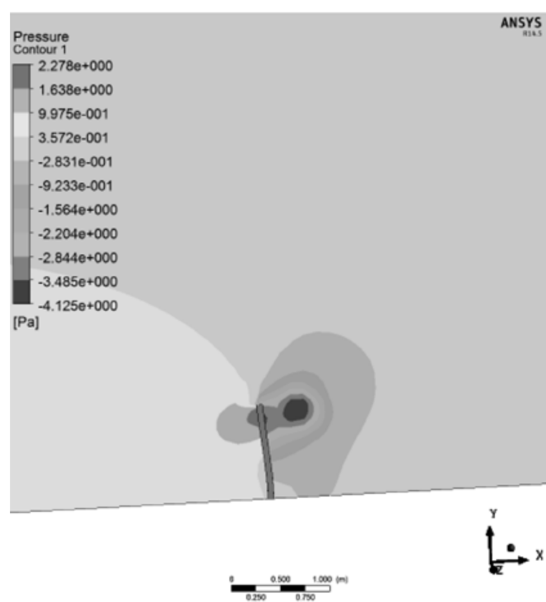


图 32-30　1.2s 时刻流场的压力云图



第 33 例　振动橡胶板的双向流-固耦合（System Coupling）

33.1　实例覆盖的知识点

读者通过学习该实例可以掌握如下 Workbench 的知识点。

1）双向流-固耦合的基本流程。

2）系统耦合器的使用方法。

3）激活橡胶超弹材料模型的方法。

4）建立基于系统耦合器的双向流-固耦合分析流程图的方法。

5）瞬态结构动力学分析步骤。

6）瞬态流体动力学分析步骤。

33.2　问题的描述

33.2.1　几何模型

图 33-1 给出了振动橡胶板双向流-固耦合分析模型，该模型主要由橡胶板和空气区域流场组成。

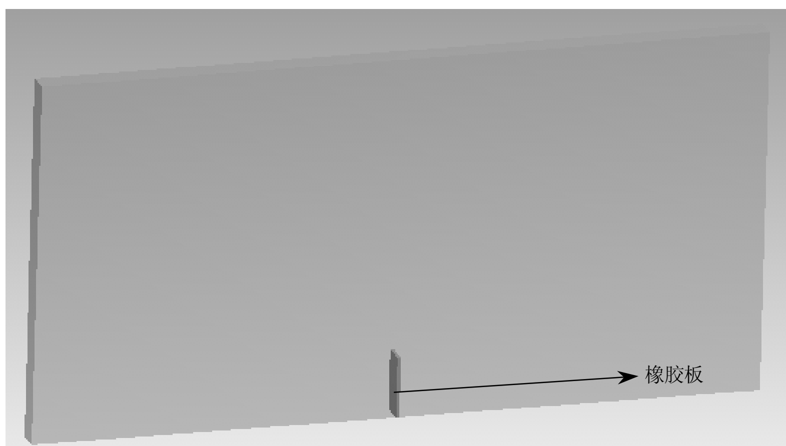


图 33-1　振动橡胶板双向流-固耦合分析

33.2.2 材料参数

本实例假设橡胶板符合应力-应变符合双参数 Mooney-Rivlin 模型计算，C_{10} = 0.52MPa，C_{01} = 0.13MPa，d=0，流场中的介质为空气，密度为 1.225kg/m^3，粘度为 1.7894E−05kg/(m·s^{-1})。

33.2.3 边界条件和载荷

结构的边界为固定橡胶板底面，在橡胶板的一个面上线性施加一个压力，在 0.48s 时刻达到最大值为 350Pa，然后突然撤去压力，总体计算时间为 1.6s。

33.3 GUI 操作

33.3.1 创建双向流-固耦合分析系统

启动 Workbench，使用鼠标将“Analysis Systems”中的“Transient Structural”和“Fluid Flow（Fluent）”拖到“Project Schematic”中，继续将“Component Systems”中的“System Coupling”和“Results”也拖到“Project Schematic”中，并且使用鼠标按照如图 33-2 所示的基于 System Coupling 的 Fluent 双向耦合流-固耦合分析系统将 4 个系统连接在一起。

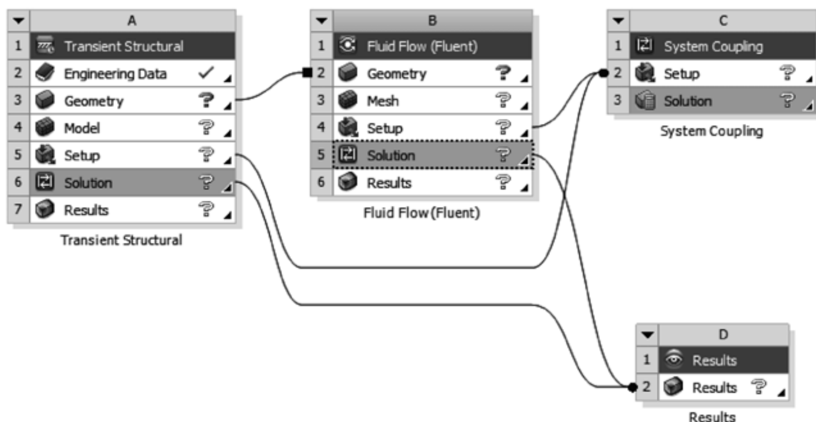


图 33-2 基于 System Coupling 的 Fluent 双向耦合流-固耦合分析系统

33.3.2 定义材料数据

单击“Transient Structural”分析系统中的“Engineering Data”子模块，在“Structural Stell”下方输入“rubber plate”，选择 Toolbox→Physical Properties，双击“Density”，选择 Toolbox→Hyperalastic，双击“Mooney-Rivlin 2 Parameters”，则出现如图 33-3 所示的“橡胶板材料参数输入”设置面板，橡胶密度为“1100”，输入“C10”为“5.2E5”，“C01”为“1.3E5”，“D1”为“0”，图 33-4 给出了该参数对应的橡胶板应力-应变关系，然后选择“Update Project”选项，最后单击“Return to Project”按钮。

Properties of Outline Row 3: plate

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Density	1100	kg m^-3		
3	Mooney-Rivlin 2 Parameter				
4	Material Constant C10	5.2E+05	Pa		
5	Material Constant C01	1.3E+05	Pa		
6	Incompressibility Parameter D1	0	Pa^-1		

图 33-3 “橡胶板材料参数输入”设置面板

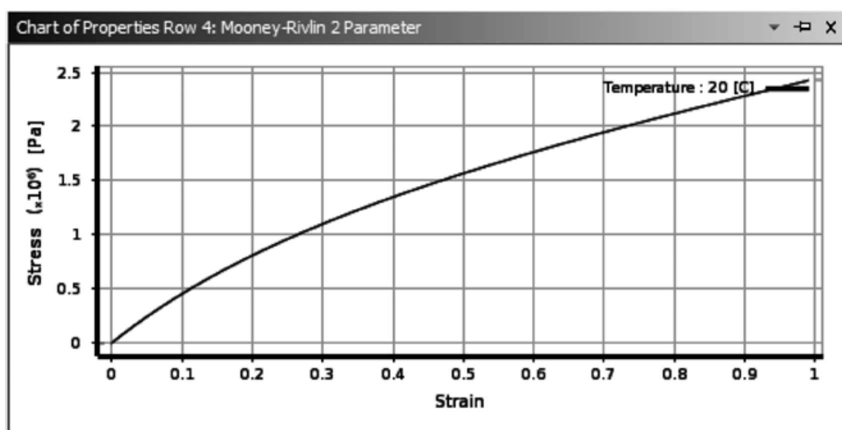


图 33-4 橡胶板应力-应变关系

33.3.3 建立几何模型

如图 33-5 所示，右击“Transient Structural”分析系统中的几何体选项，选择 Import Gemoetry→Browse，打开工作目录文件夹，选择橡胶板模型文件，单击“OK”按钮。

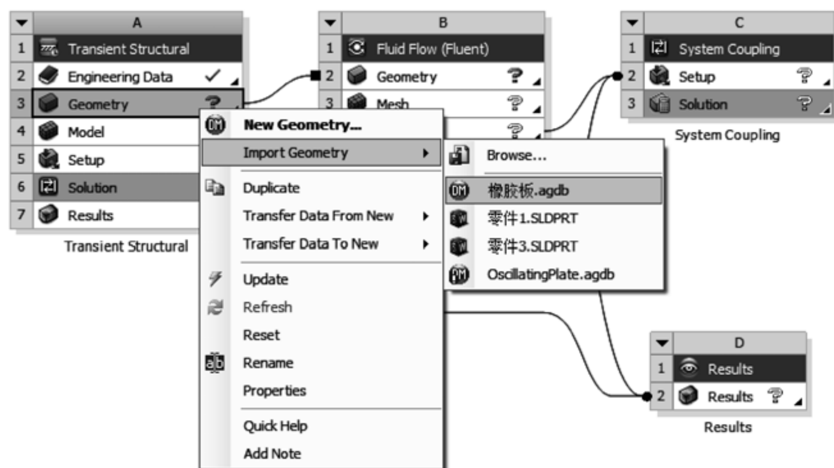


图 33-5 导入模型

33.3.4 设置瞬态结构动力学

选择瞬态结构动力学分析系统中的“Modal”选项，进入瞬态结构动力学系统，图 33-6 给出了“瞬态结构动力学分析”流程图。

1．为橡胶板赋予材料参数

（1）忽略流场区域

单击 Geometry→fluid，则在细节区域出现如图 33-7 所示的“流场区域材料细节”设置面板，设置“Suppressed”为“Yes”。

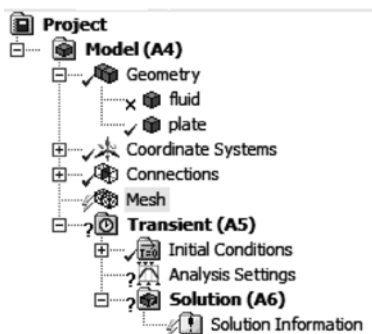


图 33-6 “瞬态结构动力学分析”流程图

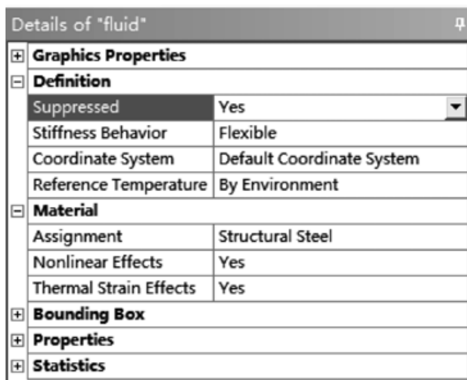


图 33-7 “流场区域材料细节”设置面板

（2）设置橡胶板的材料

单击 Geometry→plate，则在细节区域出现如图 33-8 所示的“橡胶板区域材料细节”设置面板，在“Material”选项中可以为模型指定“Assignment”，本实例选用材料为“rubber plate”。

2．划分结构网格

单击“Mesh”，弹出如图 33-9 所示的“网格划分细节”设置面板，设置“Relevance Center”为“Medium”，其他保持默认设置，然后右击“Mesh”，选择“Generate Mesh”。

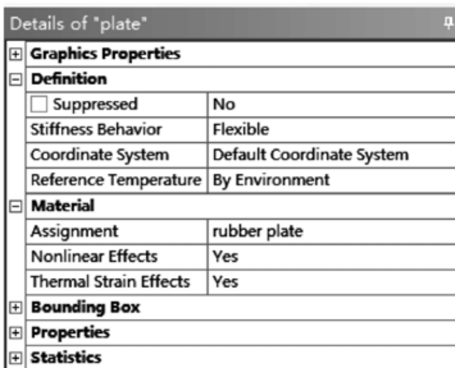


图 33-8 “橡胶板材料细节”设置面板

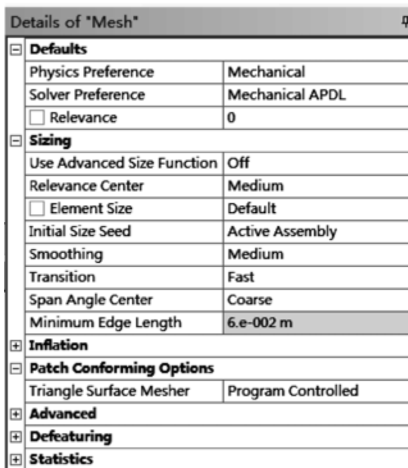


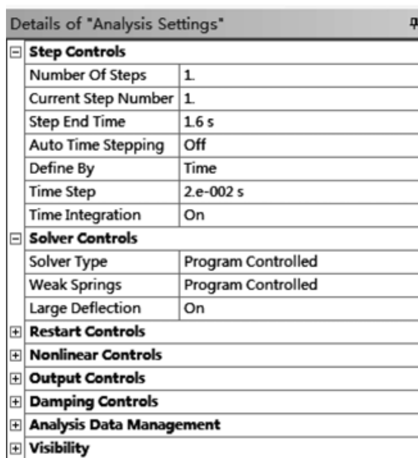
图 33-9 “网格划分细节”设置面板

3．瞬态动力学基本设置

单击“Transient”下方的“Analysis Settings”，则在细节窗口出现如图 33-10 所示的“瞬态结构动力学”设置面板，设置计算结束时间为“1.6s”。关闭自动时间步，计算的时间步长为“0.02s”。

4．完全固定约束橡胶板底面

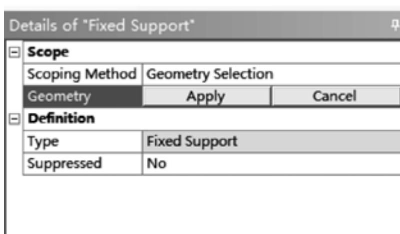
右击“Transient”，选择 Insert→Fixed Support，则在细节窗口出现如图 33-11 所示的“固定约束细节”设置面板，选择橡胶板的底面，单击“Apply”按钮。



Details of "Analysis Settings"

Step Controls	
Number Of Steps	1.
Current Step Number	1.
Step End Time	1.6 s
Auto Time Stepping	Off
Define By	Time
Time Step	2.e-002 s
Time Integration	On
Solver Controls	
Solver Type	Program Controlled
Weak Springs	Program Controlled
Large Deflection	On
Restart Controls	
Nonlinear Controls	
Output Controls	
Damping Controls	
Analysis Data Management	
Visibility	

图 33-10 “瞬态结构动力学”设置面板



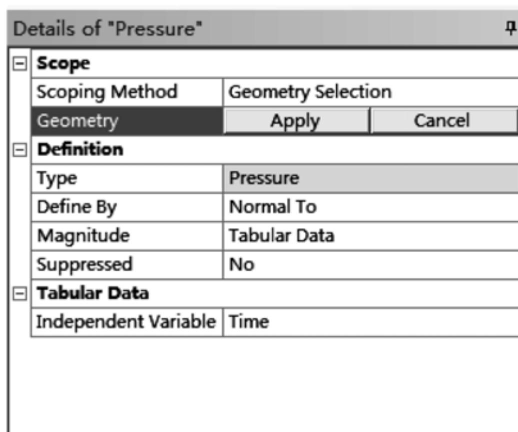
Details of "Fixed Support"

Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	Apply / Cancel
Definition	
Type	Fixed Support
Suppressed	No

图 33-11 “固定约束细节”设置面板

5．施加压力

右击“Transient”，选择 Insert→Pressure，则在细节窗口出现如图 33-12 所示的“压力细节”设置面板，选择橡胶板的一个侧面，单击“Apply”按钮，设置“Magnitude”为“表格”，图 33-13 给出了压力随时间变化的表格，按照图 33-13 所示进行输入数据。



Details of "Pressure"

Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	Apply / Cancel
Definition	
Type	Pressure
Define By	Normal To
Magnitude	Tabular Data
Suppressed	No
Tabular Data	
Independent Variable	Time

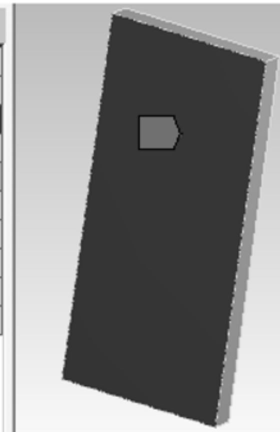


图 33-12 “压力细节”设置面板

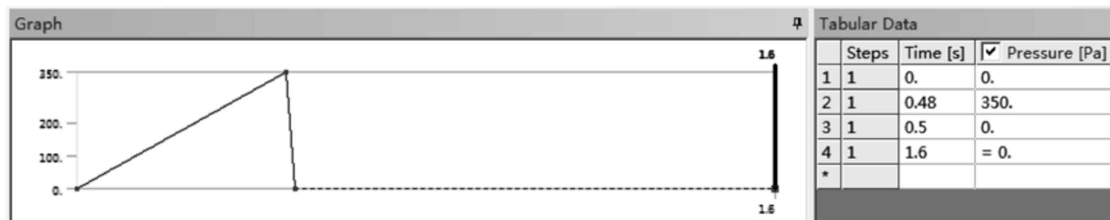


图 33-13　压力与时间的关系曲线

6．设置流固耦合界面

与单向流-固耦合不同，双向流-固耦合分析不是直接导入流体计算结果，而是通过预先设定一个流固耦合界面，在计算中使用该界面实时的传递和接收数据。

右击“Transient”，选择 Insert→Fluid Solid Interface，则在细节窗口出现如图 33-14 所示的“流-固耦合界面细节”设置面板，选择除橡胶板的底面和侧面的其他 3 个面，单击“Apply”按钮，其他设置保持默认。

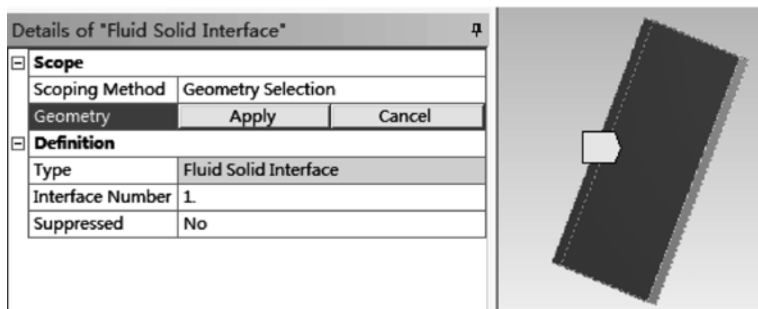


图 33-14　“流-固耦合界面细节”设置面板

回到“Project Schematic”，右击瞬态结构动力学分析系统中的“Setup”，选择“Update”，单击“Save”按钮，弹出“保存文件”对话框，输入保存工程的文件名为“Two-way flow of solid coupling”，单击“保存”按钮。

33.3.5 设置流体动力学

1．划分流体区域网格

（1）忽略橡胶板

双击“Fluid Flow（Fluent）”中的“Mesh”，进入流体网格划分系统，展开 Geometry→Plate，单击“Plate”，则在细节窗口出现如图 33-15 所示的“橡胶板材料细节”设置窗口，设置“Suppressed”为“Yes”。

（2）划分流体区域网格

单击“Mesh”，弹出如图 33-16 所示的“网格划分细节”设置面板，设置“Relevance Center”为“Medium”，“Use Advanced Size Function”为“On：Proximity”，其他保持默认设置，然后右击“Mesh”，选择“Generate Mesh”。

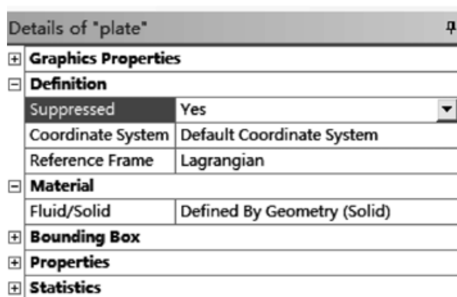


图 33-15 “橡胶板材料细节”设置窗口

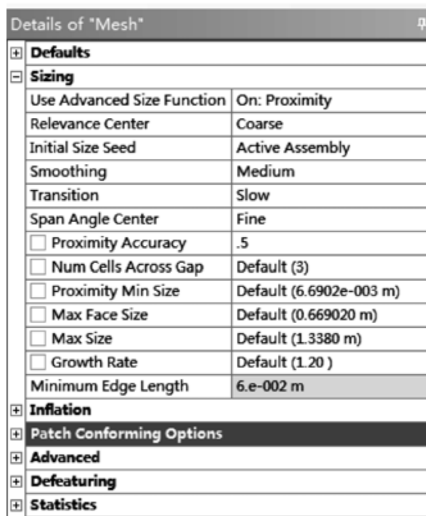


图 33-16 “网格划分细节”设置面板

（3）为流体计算设置边界名

该步的操作可以参见本章的视频教程，在该步中将两侧的对称面分别命名为“sym1”和“sym2”，将与橡胶板的交接面命名为“wall_deforming”，将入口的面命名为“wall_inlet”，将出口的面命名为“wall_outlet”，将底面命名为“wall_bottom”，将顶面命名为“wall_top”。

（4）更新流体网格

回到“Project Schematic”，右击流体分析系统中的“Setup”，选择“Update”。

2．设置分析类型

（1）进入 Fluent

双击流体分析系统中的“Setup”，则弹出如图 33-17 所示的“Fluent 启动”设置面板，设置“Processing Options”为“Parallel”，并输入“Number of Processes”为“4”，单击“OK”按钮进入“Fluent”。

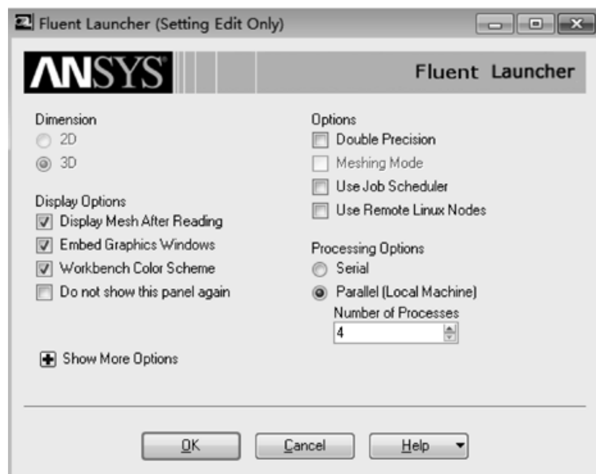


图 33-17 “Fluent 启动”设置面板

（2）设置分析类型

单击“General”，则出现如图 33-18 所示的“Fluent 求解器”设置面板，设置求解器类型为“Pressure-Based”，求解的时间为“Transient”，其他保持默认设置。

3．定义湍流模型

GUI：Models→Viscous-Laminar→Edit，弹出如图 33-19 所示的“流体粘性模型”设置面板，选择流体湍流模型为“k-epsilon(2 equ)”，其他保持默认设置，单击“OK”按钮。

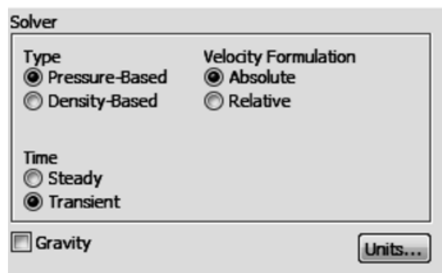


图 33-18 “Fluent 求解器”设置面板



图 33-19 “流体粘性模型”设置面板

4．定义动网格

（1）动网格基本设置

GUI：Dynamic Mesh→Smoothing→Settings，弹出如图 33-20 所示的“动网格”设置面板，选择“Method”为“Diffusion”，设置“Diffusion Parameter”为“2”，单击“OK”按钮。

（2）创建动网格区域

GUI：Dynamic Mesh→Creat/Edit，弹出如图 33-21 所示的“动网格区域创建”设置面板，从“Zone Names”中选择“sym1”，设置“Type”为“Deforming”，单击面板下方的“Gemetry Definition”，设置“Defintion”为“plane”，“Poiont on plane”为“0,0,0”，“Plane Normal”为“0,0,1”，单击“Creat”；从“Zone Names”中选择“sym2”，设置“Type”为“Deforming”，单击面板下方的“Gemetry Definition”，设置“Defintion”为“plane”，“Poiont on plane”为“0,0,0.4”，“Plane Normal”为“0,0,1”，单击“Creat”；从“Zone Names”中选择“wall_deforming”，设置“Type”为“System Coupling”，单击“Creat”；从“Zone Names”中选择“wall_bottom”，设置“Type”为“Stationary”，单击“Creat”；从“Zone Names”中选择“wall_inlet”，设置“Type”为“Stationary”，单击“Creat”；从“Zone Names”中选择“wall_outlet”，设置“Type”为“Stationary”，单击“Creat”；从“Zone Names”中选择



“wall_top”，设置“Type”为“Stationary”，单击“Creat”，然后单击“Colse”按钮。

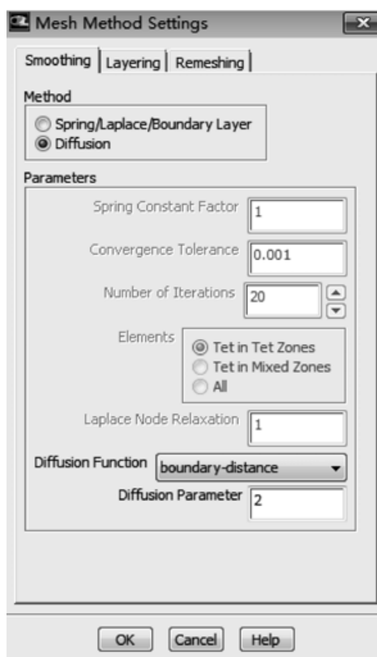


图 33-20 “动网格”设置面板



图 33-21 “动网格区域创建”设置面板

5．设置计算激活选项

GUI：Solution→Caculation Activities，则出现如图 33-22 所示的“计算激活选项”设置面板，设置“Autosave Every（Time Steps）”为“2”。

6．设置运行计算

GUI：Solution→Run Calculation，则弹出如图 33-23 所示的“运行计算”设置面板，输入“Number of Time Steps”为“10”，“Max Iterations/Time Step”为“5”，默认的“Time Step Size”为“1”，其中“Number of Time Steps”和“Time Step Size”在系统耦合器可以覆盖修改。

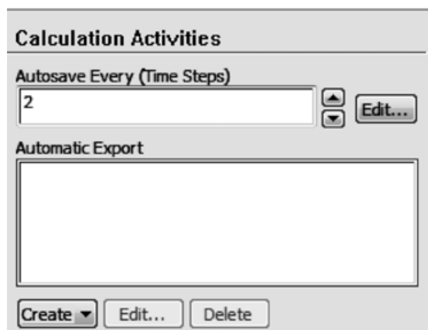


图 33-22 “计算激活选项”设置面板



图 33-23 “运行计算”设置面板

7．初始化流场

保存流体分析文件，然后按照下列路径操作：

GUI： Solution → Solution Initialization， 选择 “Initialization Methods” 为 “Standard InInitialization”，单击“Initialize”。

33.3.6 设置系统耦合器

1．进入系统耦合器

双击“Project Schematic”中“System Coupling”中的“Setup”，弹出一个消息提示框，单击“是”按钮，则进入如图 33-24 所示的系统耦合器分析系统。

2．系统耦合的基本设置

单击“Analysis Settings”，则出现如图 33-25 所示的“系统耦合器基本设置”面板，输入“End Time”为“1.6”，“Step Size”为“0.02”，“Minmum Interations”为“1”，“Maximum Iterations”为“10”。

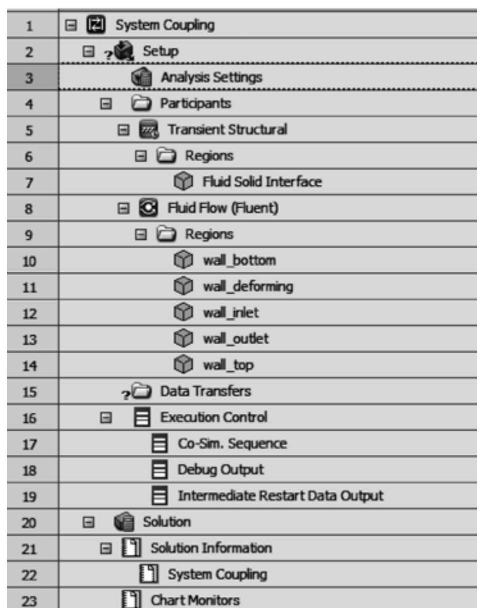


图 33-24 系统耦合器分析系统

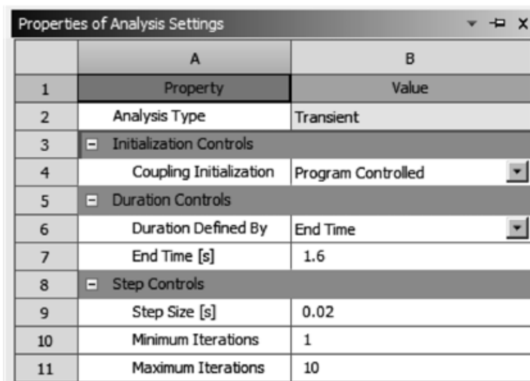


图 33-25 “系统耦合器基本设置”面板

3．创建数据传递界面

按住〈Ctrl〉键，选择“Fluid Solid Interface”和“wall_deforming”，右击选择“Create Dara Transfer”。

4．开始计算

右击“Solution”，选择“Update”。

5．后处理

图 33-26～图 33-31 分别给出了橡胶板不同时刻的等效应力云图，图 33-32 给出了橡胶板的最大等效应力与时间的关系曲线，图 33-33 和图 33-34 分别给出了流场不同时刻的压力云图，具体查看方法读者可以参见本章视频教程。

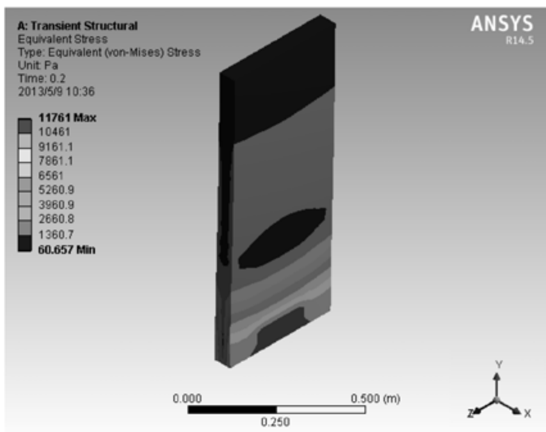


图 33-26　0.2s 时刻橡胶板的等效应力云图

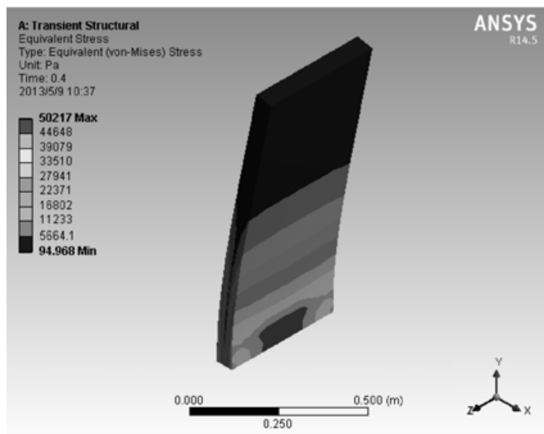


图 33-27　0.4s 时刻橡胶板的等效应力云图

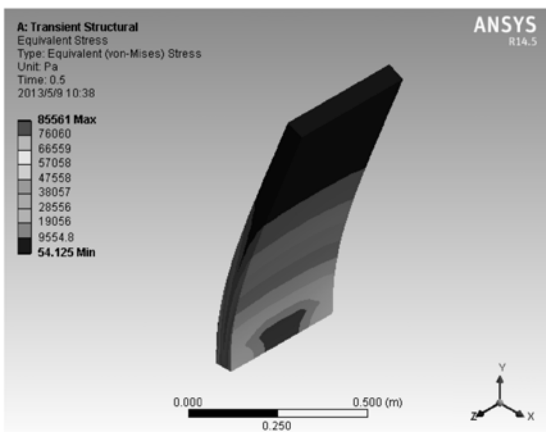


图 33-28　0.5s 时刻橡胶板的等效应力云图

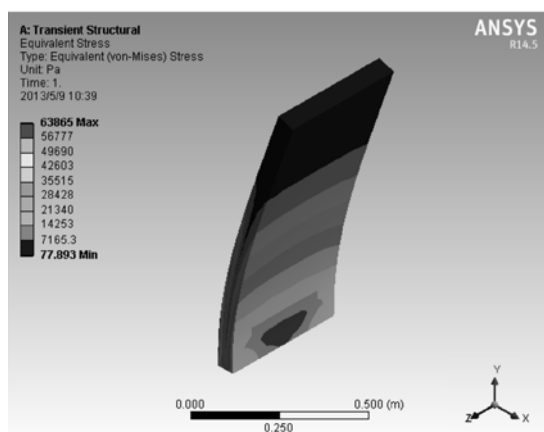


图 33-29　1s 时刻橡胶板的等效应力云图

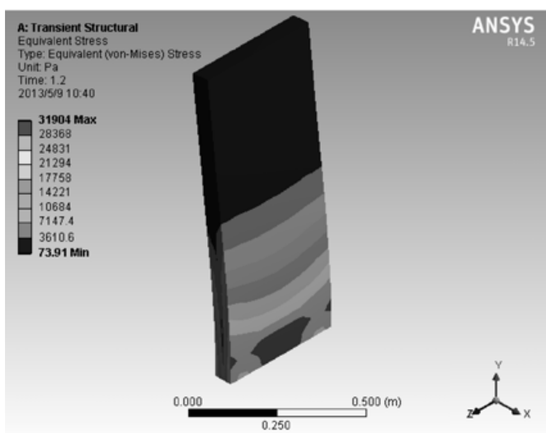


图 33-30　1.2s 时刻橡胶板的等效应力云图

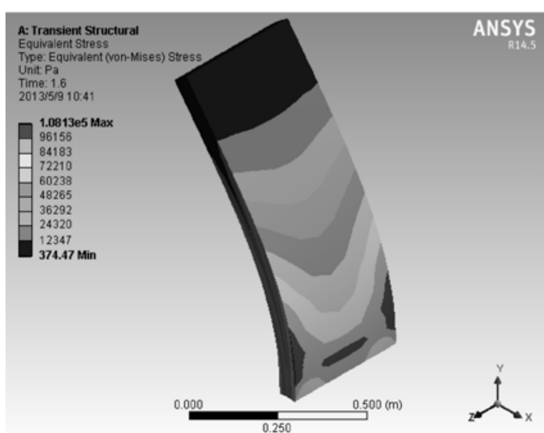


图 33-31　1.6s 时刻橡胶板的等效应力云图

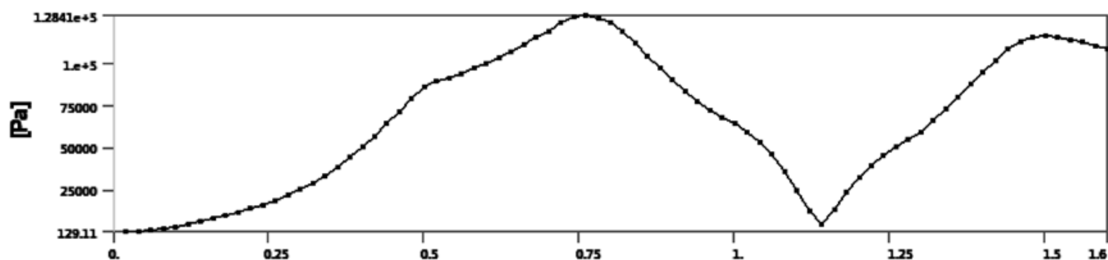


图 33-32　橡胶板的最大等效应力与时间的关系曲线

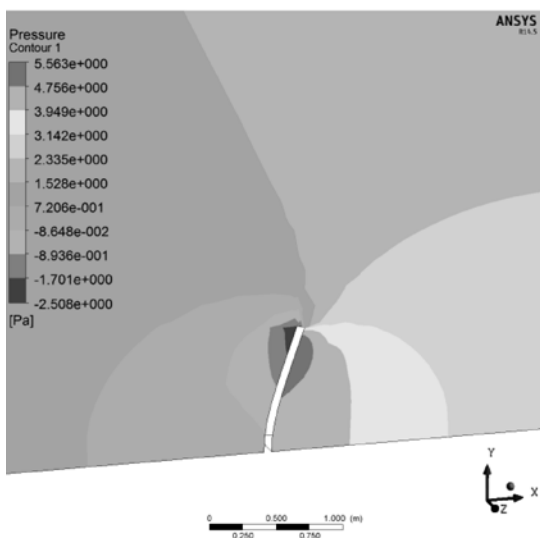


图 33-33　0.4s 时刻流场压力云图

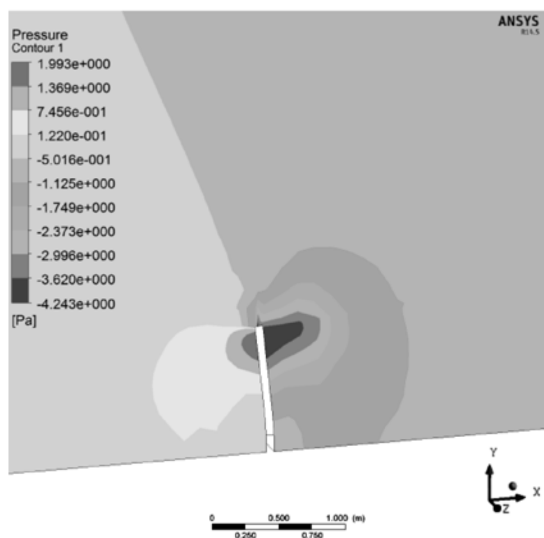


图 33-34　1.2s 时刻流场压力云图

第 34 例　多盘转子系统动力学分析

34.1　实例覆盖的知识点

读者通过学习该实例可以掌握如下 Workbench 的知识点。

1）转子系统模态分析的基本步骤。

2）考虑转子系统陀螺效应的方法。

3）创建转子系统轴承支撑约束的方法。

4）设置转子系统阻尼的方法。

5）创建转子系统坎贝尔图的方法。

6）获取转子系统临界转速的方法。

34.2　问题的描述

34.2.1 几何模型

图 34-1 给出了多盘转子系统的三维模型，该模型由 3 个转盘、1 个转轴和 3 个轴承组成，图中将从左到右的轴承分别编号为轴承 1、轴承 2 和轴承 3。

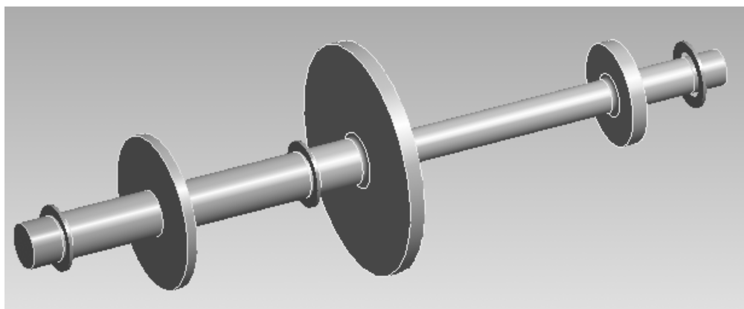


图 34-1　多盘转子系统三维模型

34.2.2 材料参数

该转子系统的材料为结构钢，其中弹性模量为 2.1E11Pa，泊松比为 0.31，密度为 7500kg/m^3。轴承 1 的 K_x=1.1E8N/m，K_y=1.1E8N/m，C_x=100N·s/m，C_y=100N·s/m；轴承 2 的 K_x=1.2E8N/m，K_y=1.2E8N/m，C_x=100N·s/m，C_y=100N·s/m；轴承 3 的 K_x=1.5E8N/m，K_y=1.5E8N/m，C_x=100N·s/m，C_y=100N·s/m。



34.2.3 边界条件和载荷

在 3 个轴承处施加 3 个轴承，并且约束整个转子模型的轴向和转动位移。为了得到坎贝尔图，必须提供多个转速，转速值如下：0.1rad/s、50rad/s、200rad/s、500rad/s、800rad/s、1000rad/s、1200rad/s 和 1500rad/s。

34.3 GUI 操作

34.3.1 建立模态分析系统

启动 Workbench，双击 Workbench 工具箱中-Modal，弹出如图 34-2 所示的“模态分析系统”工程图。

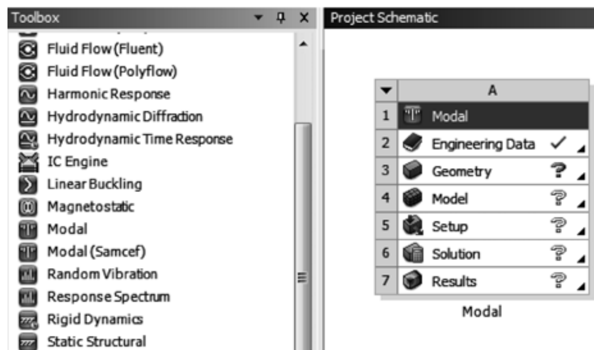


图 34-2 “模态分析系统”工程图

34.3.2 定义材料数据

单击模态分析系统中的“Engineering Data”子模块，选择“Structural Steel”上的“结构钢”选项，弹出如图 34-3 所示的“结构钢材料”数据表，将密度修改为“7500”，杨氏模量为“2.1E11”，泊松比为“0.31”，然后选择“Update Project”选项，最后单击“Return to Project”按钮。

Properties of Outline Row 3: Structural Steel

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Density	7500	kg m^-3		
3	⊟ Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion				
4	Coefficient of Thermal Expansion	1.2E-05	C^-1		
5	Reference Temperature	22	C		
6	⊟ Isotropic Elasticity				
7	Derive from	Young's M...			
8	Young's Modulus	2.1E+11	Pa		
9	Poisson's Ratio	0.31			
10	Bulk Modulus	1.8421E+11	Pa		
11	Shear Modulus	8.0153E+10	Pa		

图 34-3 “结构钢材料”数据列表

34.3.3 建立几何模型

如图 34-4 所示，右击模态分析系统中的几何体选项，选择 Import Gemoetry→Browse，打开工作目录文件夹，选择三盘转子系统模型文件，单击“OK”按钮。

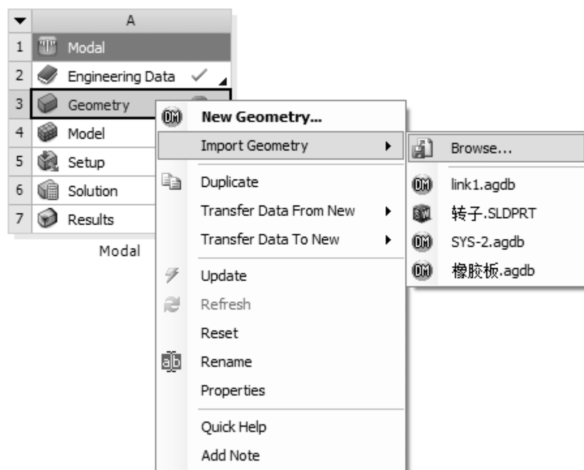


图 34-4　导入模型

34.3.4 创建有限元模型

选择预应力模态分析系统中的结构分析中的“Modal”选项，进入模态分析系统，图 34-5 给出了“预应力模态分析”流程图。

1．为转子系统赋予材料

单击 Model→Geometry→所有转子，则弹出如图 34-6 所示的“转子系统材料细节”设置面板，用户一般只需设置该面板的两个子选项，即“Definition”和“Material”选项。在“Definition”选项中，用户可以设置模型的“Stiffness Behavior”“Coordinate System”和“Reference Temperature”，在“Material”选项中可以为模型指定“Assignment”，本实例选用材料为“Structural Steel”。

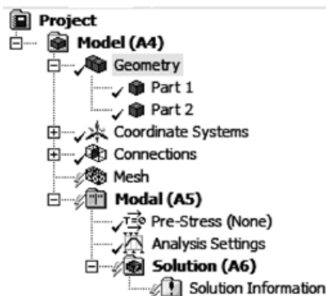


图 34-5　“预应力模态分析”流程图

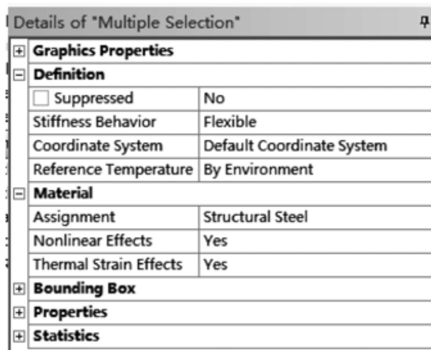


图 34-6　“转子系统材料细节”设置面板

2．创建轴承

（1）创建轴承 1

右击“Connection”，选择 Insert→Bearing，则出现如图 34-7 所示的“轴承 1 细节”设置面板，输入轴承刚度“K11”和“K22”都为“1.1E8”，阻尼“C11”和“C22”都为“100”，设置轴承的“Rotation Plane”为“X-Y Plane”，选择轴承 1 的面，单击“Apply”按钮。

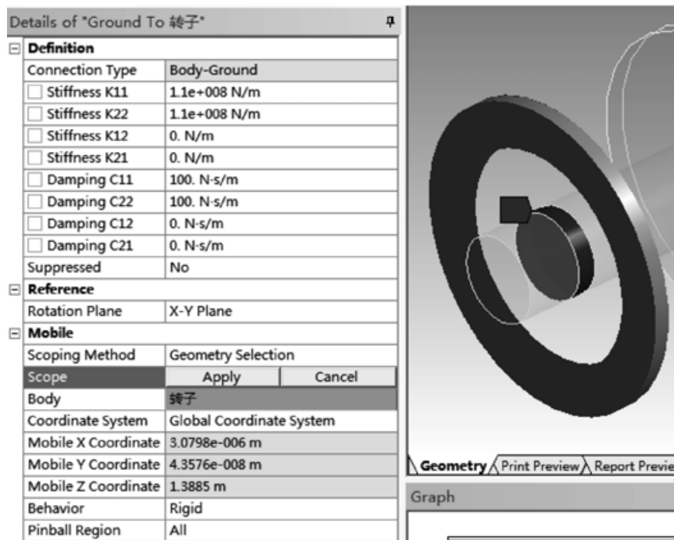


图 34-7 “轴承 1 细节”设置面板

（2）创建轴承 2

右击“Connection”，选择 Insert→Bearing，则出现如图 34-8 所示的“轴承 2 细节”设置面板，输入轴承刚度“K11”和“K22”都为“1.2E8”，阻尼“C11”和“C22”都为“100”，设置轴承的“Rotation Plane”为“X-Y Plane”，选择轴承 2 的面，单击“Apply”按钮。

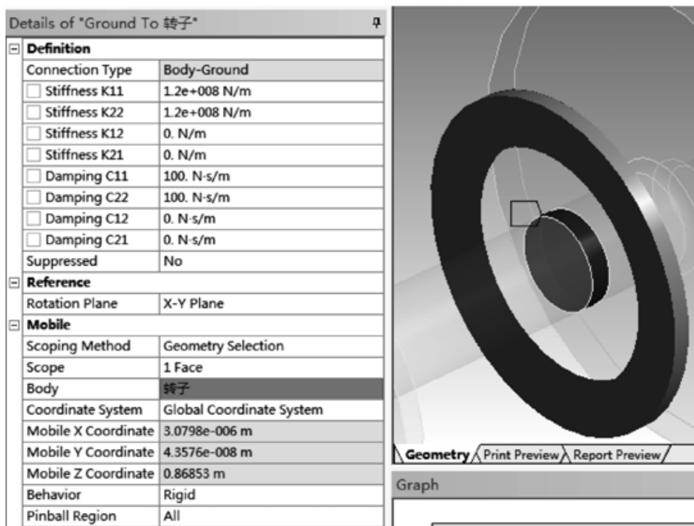


图 34-8 “轴承 2 细节”设置面板

（3）创建轴承 3

右击“Connection”，选择 Insert→Bearing，则出现如图 34-9 所示的“轴承 3 细节”设置面板，输入轴承刚度“K11”和“K22”都为“1.5E8”，阻尼“C11”和“C22”都为“100”，设置轴承的“Rotation Plane”为“X-Y Plane”，选择轴承 3 的面，单击“Apply”按钮。

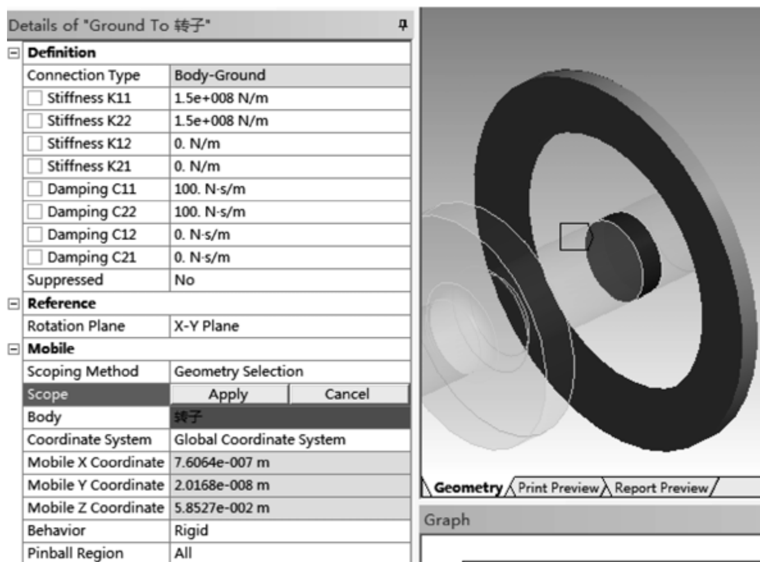


图 34-9 “轴承 3 细节”设置面板

3．网格划分

单击“Mesh”，弹出如图 34-10 所示的“网格划分细节”设置面板，设置“Relevance Center”为“Medium”，其他保持默认设置，然后右击“Mesh”，选择“Generate Mesh”。

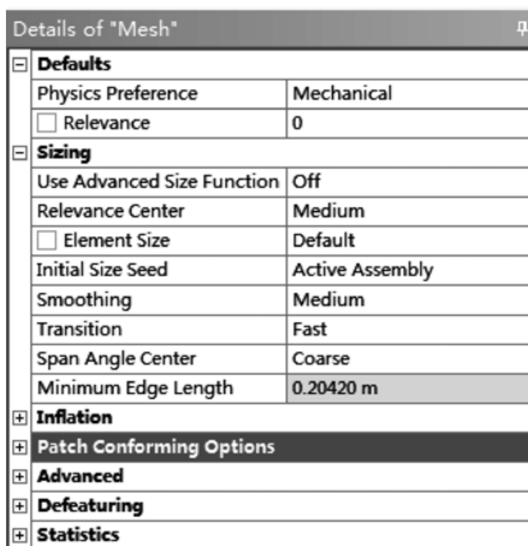


图 34-10 “网格划分细节”设置面板

34.3.5 模态求解

1．模态分析设置

单击 Modal→Analysis Settings，在细节显示窗口弹出如图 34-11 所示的“模态分析细节”设置面板，修改提取的“Max Modes to Find”为“10”，将“Damped”设置为“Yes”，设置“Rotordynamics Controls”选项分别为激活“Coriolis Effect”和“Campbell Diagram”，并设置速度点为“8”，其他设置保持默认。

2．定义远端位移

右击“Modal”，选择 Insert→Remote Displacement，则出现如图 34-12 所示的“远端位移细节”设置面板，选择整个转子系统的表面，单击“Apply”按钮，设置“Z Component”和“Rotation Z”都为“0”，即约束模型的轴向和绕轴向的转动位移。

Details of "Analysis Settings"

Options	
Max Modes to Find	10
Limit Search to Range	No
Solver Controls	
Damped	Yes
Solver Type	Program Controlled
Rotordynamics Controls	
Coriolis Effect	On
Campbell Diagram	On
Number of Points	8
Mode Reuse	Program Controlled
Output Controls	
Damping Controls	
Analysis Data Management	

图 34-11 “模态分析细节”设置面板

Details of "Remote Displacement"

Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	37 Faces
Coordinate System	Global Coordinate System
X Coordinate	1.3094e-005 m
Y Coordinate	2.0891e-009 m
Z Coordinate	0.79633 m
Location	Click to Change
Definition	
Type	Remote Displacement
X Component	Free
Y Component	Free
Z Component	0. m
Rotation X	Free
Rotation Y	Free
Rotation Z	0. °
Suppressed	No
Behavior	Deformable
Advanced	

图 34-12 “远端位移细节”设置面板

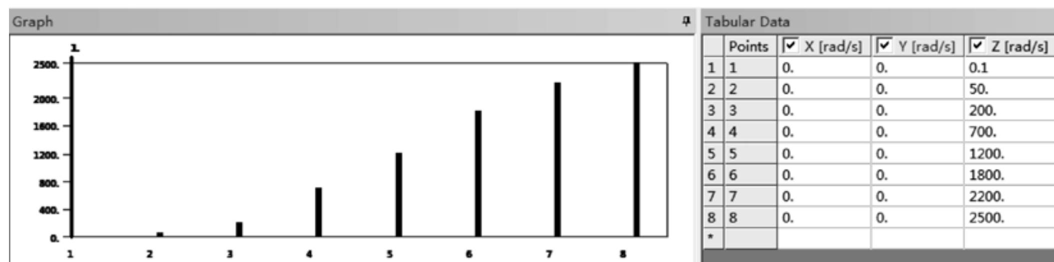
3．定义转速

右击“Modal”，选择 Insert→Rotational Velocity，则在细节窗口出现如图 34-13 所示的“转速细节”设置面板，设置转速的定义方式为“Components”，其他保持默认设置，如图 34-14 所示给出了画坎贝尔图需要的转速点表格及示意图，读者根据图 34-14 输入相应的转速。

Details of "Rotational Velocity"

Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	All Bodies
Definition	
Define By	Components
Coordinate System	Global Coordinate System
X Component	Tabular Data
Y Component	Tabular Data
Z Component	Tabular Data
X Coordinate	0. m
Y Coordinate	0. m
Z Coordinate	0. m
Suppressed	No

图 34-13 “转速细节”设置面板



	Points	X [rad/s]	Y [rad/s]	Z [rad/s]
1	1	0.	0.	0.1
2	2	0.	0.	50.
3	3	0.	0.	200.
4	4	0.	0.	700.
5	5	0.	0.	1200.
6	6	0.	0.	1800.
7	7	0.	0.	2200.
8	8	0.	0.	2500.
*				

图 34-14　转速点设置表格与示意图

4．求解

选择 Static Structural→Solution，右击“Solution”，选择“Solve”。

5．查看结果

图 34-15～图 34-18 分别给出了多盘转子系统的前 4 阶模态振型云图，图 34-19 给出了多盘转子系统模态求解列表，图 34-20 给出了多盘转子系统的坎贝尔图，图 34-21 给出了多盘转子系统临界转速列表，具体查看方法读者可以参见本章的视频教程。

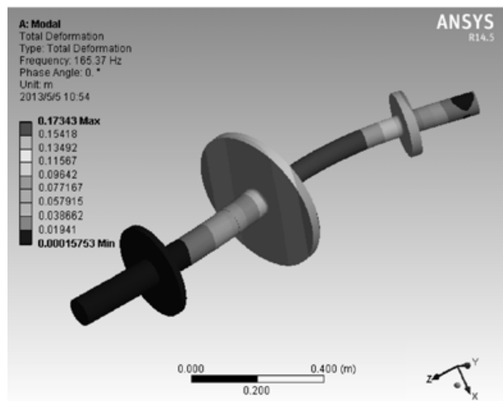


图 34-15　多盘转子系统 1 阶模态振型云图

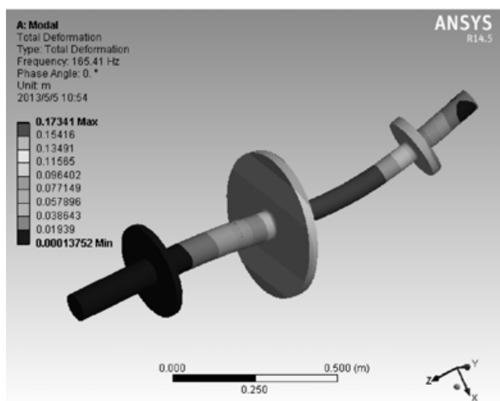


图 34-16　多盘转子系统 2 阶模态振型云图

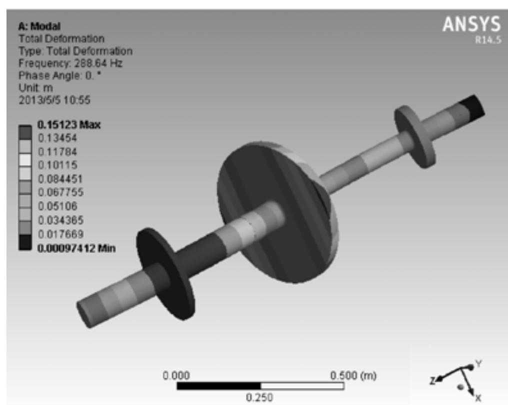


图 34-17　多盘转子系统 3 阶模态振型云图

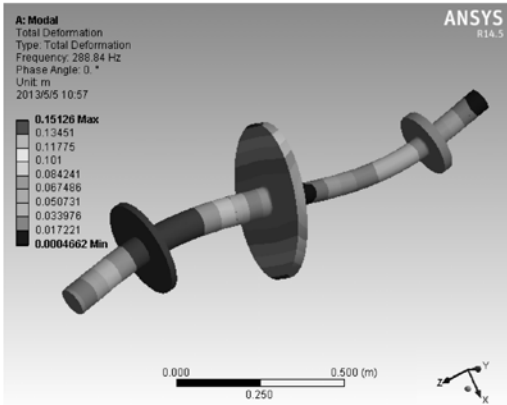


图 34-18　多盘转子系统 4 阶模态振型云图

	Set	Solve Point	Mode	☑ Damped Frequency [Hz]	☐ Stability [Hz]	☐ Modal Damping Ratio	☐ Logarithmic Decrement
1	1.	1.	1.	165.37	-3.8622e-002	2.3355e-004	-1.4674e-003
2	2.	1.	2.	165.41	-3.8687e-002	2.3388e-004	-1.4695e-003
3	3.	1.	3.	288.64	-0.13692	4.7438e-004	-2.9806e-003
4	4.	1.	4.	288.84	-0.13723	4.7512e-004	-2.9853e-003
5	5.	1.	5.	396.16	-0.10946	2.7631e-004	-1.7361e-003
6	6.	1.	6.	396.29	-0.10991	2.7735e-004	-1.7426e-003
7	7.	1.	7.	421.53	0.	0.	0.
8	8.	1.	8.	511.35	-6.9734e-003	1.3637e-005	-8.5686e-005
9	9.	1.	9.	511.43	-0.255	4.986e-004	-3.1328e-003
10	10.	1.	10.	513.11	-0.25946	5.0566e-004	-3.1771e-003

图 34-19 多盘转子系统模态求解列表

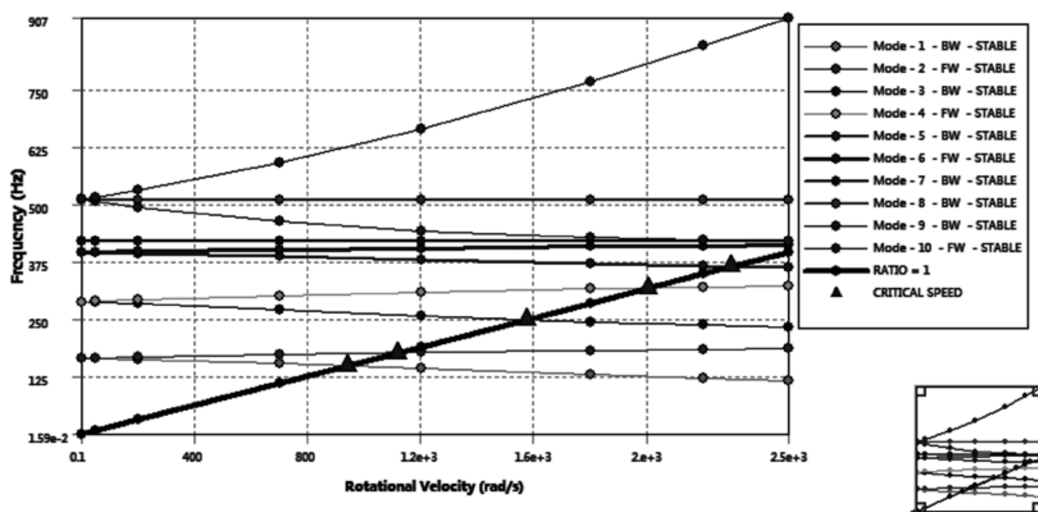


图 34-20 多盘转子系统的坎贝尔图

Critical Speed [rad/s]	
☐ Mode-1	938.34
☐ Mode-2	1116.9
☐ Mode-3	1571.4
☐ Mode-4	2004.6
☐ Mode-5	2298.3
☐ Mode-6	0.
☐ Mode-7	0.
☐ Mode-8	0.
☐ Mode-9	0.
☐ Mode-10	0.

图 34-21 多盘转子系统临界转速列表

第 35 例　悬臂梁的直接优化设计（Direct Optimization）

35.1　实例覆盖的知识点

读者通过学习该实例可以掌握如下 Workbench 的知识点。

1）直接优化设计的基本流程。

2）将模型数据参数化的方法。

3）静力学分析的基本步骤。

4）参数管理器的使用方法。

5）优化设计的基本设置方法。

6）创建优化设计的变量、约束条件和目标函数的方法。

7）查看优化设计结果的方法。

35.2　问题的描述

35.2.1　几何模型

图 35-1 给出了悬臂梁优化设计模型，该悬臂梁制有两个工艺圆孔，其中悬臂梁的优化设计几何变量分别为两个圆孔圆心距离 L，厚度 W，左边圆孔半径 R_1 和右边圆孔半径 R_2。

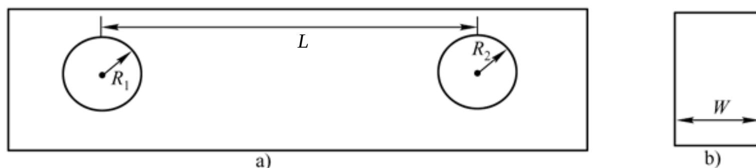


图 35-1　悬臂梁优化设计模型

a) 悬臂梁的正视图　b) 悬臂梁的侧视图

35.2.2　材料参数

该实例悬臂梁为结构钢，弹性模量为 2.1E11Pa，泊松比为 0.31。

35.2.3 边界条件和载荷

完全固定约束悬臂梁的左侧端面，在悬臂梁的右侧端面施加一个竖直向下的集中力 F 为 5000N。

35.2.4 优化设计参数设置

1．设计变量

本实例选用如图 35-1 所示的圆孔圆心距离 L，厚度 W，左边圆孔半径 R_1 和右边圆孔半径 R_2 为几何设计变量，悬臂梁右侧端面竖直向下的集中力 F 为静力学载荷设计变量，其中 L 取值范围为 0.2～0.9m，厚度 W 取值范围 0.05～0.2m，R_1 和 R_2 的取值范围为 0.01～0.08m，集中力 F 的取值范围为-5000～-2E4。

2．约束条件

本实例选用悬臂梁的最大等效应力和最大变形量为约束条件，其中最大等效应力要求小于 200E6Pa，最大变形量要小于 0.0025m。

3．目标函数

该实例优化的目标函数就是在设计变量和约束条件的共同作用下，寻求悬臂梁的最小质量。

35.3 GUI 操作

35.3.1 创建静力学分析系统

启动 Workbench，双击“Workbench Toolbox”下的“Static Structural”，弹出如图 35-2 所示的“静力学分析系统”工程图。

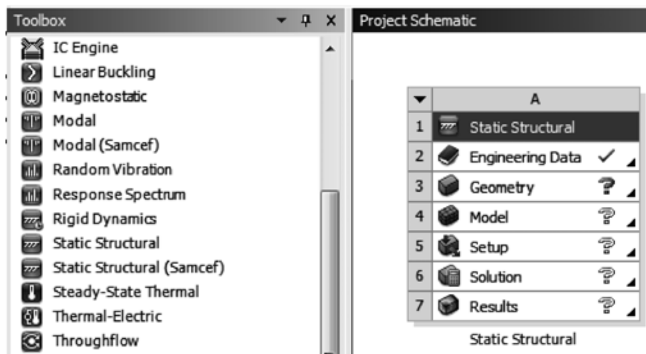


图 35-2 “静力学分析系统”工程图

35.3.2 定义材料数据

单击静力学分析系统中的“Engineering Data”子模块，选择“Structural Steel”上的“结构钢”选项，弹出如图 35-3 所示的“结构钢材料”数据表，重新输入杨氏模量设置为

“2.1E11”，泊松比为“0.31”，然后选择“Update Project”选项，最后单击“Return to Project”按钮。

Properties of Outline Row 3: Structural Steel

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Density	7850	kg m^-3		
3	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion				
4	Coefficient of Thermal Expansion	1.2E-05	C^-1		
5	Reference Temperature	22	C		
6	Isotropic Elasticity				
7	Derive from	Young's M...			
8	Young's Modulus	2.1E+11	Pa		
9	Poisson's Ratio	0.31			
10	Bulk Modulus	1.8421E+11	Pa		
11	Shear Modulus	8.0153E+10	Pa		
12	Alternating Stress Mean Stress	Tabular			

图 35-3 “结构钢材料”数据列表

35.3.3 建立几何模型

如图 35-4 所示，右击静力学分析系统中的几何体选项，选择 Import Gemoetry→Browse，打开工作目录文件夹，选择悬臂梁模型文件，单击“OK”按钮。

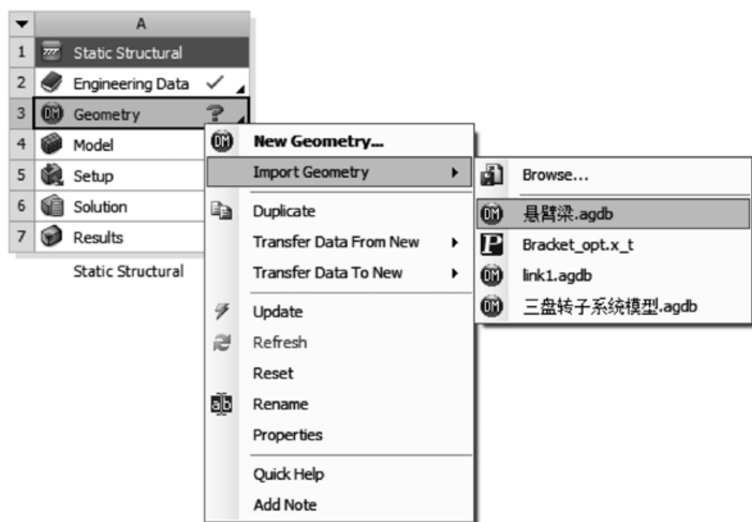


图 35-4 导入模型

35.3.4 创建有限元模型

选择静力学分析系统中的结构分析中的“Modal”选项，进入静力学分析系统。

1．提取悬臂梁的质量作为优化参数

单击 Model→Geometry→Solid，则弹出如图 35-5 所示的“悬臂梁细节”设置面板，用

户一般只需设置该面板的两个子选项，即“Definition”和“Material”选项。在“Definition”选项中，用户可以设置模型的“Stiffness Behavior”“Coordinate System”和“Reference Temperature”，在“Material”选项中可以为模型指定“Assignment”，本实例选用材料为“Structural Steel”，单击“Properties”将该项展开，并且勾选“Mass”，则程序会在“Mass”前出现一个P符号，表明悬臂梁的质量已经被参数化可用于优化设计。

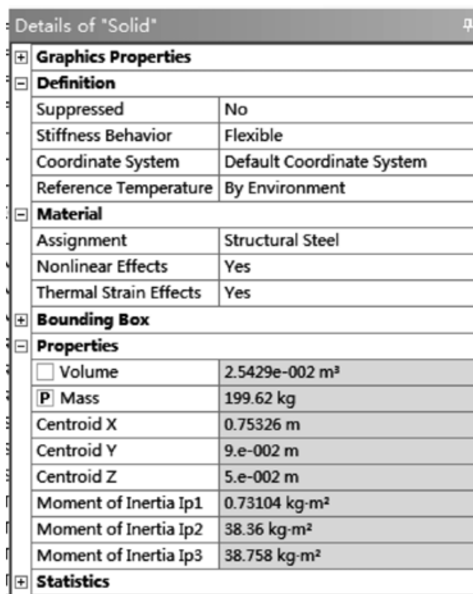


图 35-5 “悬臂梁细节”设置面板

2．网格划分

单击“Mesh”，弹出如图 35-6 所示的“网格划分细节”设置面板，设置“Relevance Center”为“Fine”，其他保持默认设置，然后右击“Mesh”，选择“Generate Mesh”。

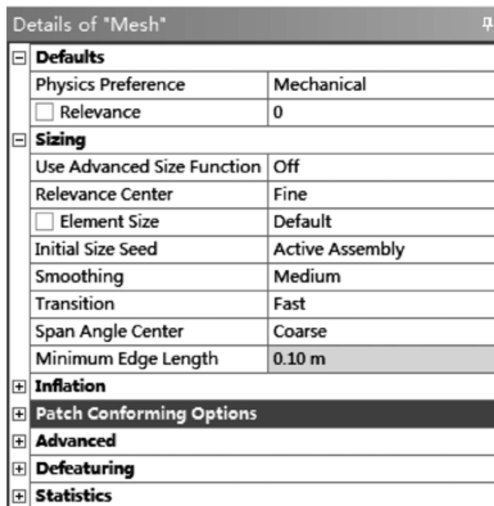


图 35-6 “网格划分细节”设置面板



35.3.5 静力学分析

1．静力学分析设置

单击“Static Structural”下方的“Analysis Settings”，则会出现如图 35-7 所示的“静力学分析细节”设置面板，设置“Large Deflection”为“On”，表明激活了大变形。

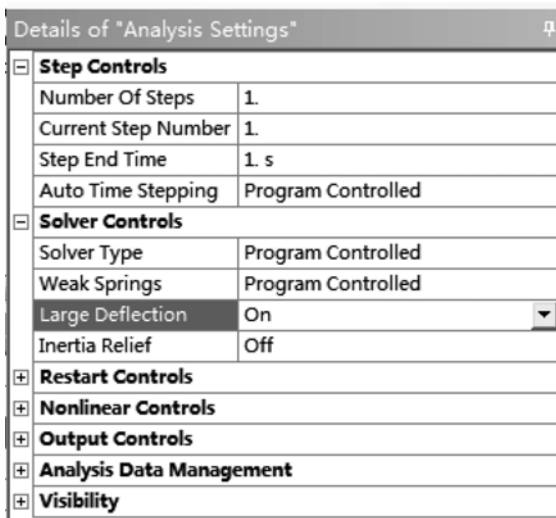


图 35-7 “静力学分析细节”设置面板

2．施加固定约束

右击“Static Structural”，选择 Insert→Fixed Support，则在细节窗口出现如图 35-8 所示的“固定约束细节”设置面板，选择悬臂梁的左侧端面，单击“Apply”按钮。

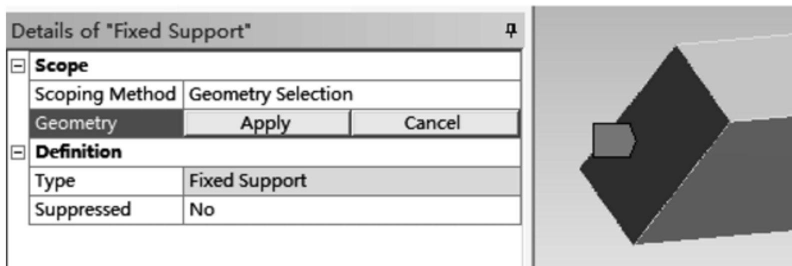


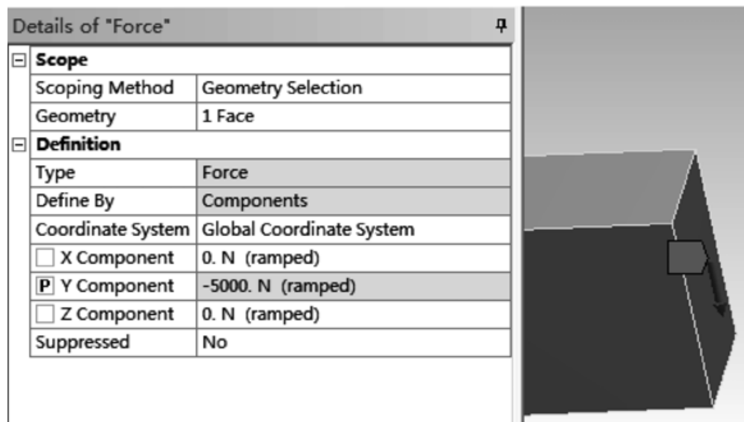
图 35-8 “固定约束细节”设置面板

3．施加力

右击“Static Structural”，选择 Insert→Force，则在细节窗口出现如图 35-9 所示的“施加力细节”设置面板，选择悬臂梁的右侧端面，单击“Apply”按钮，设置施加方式为“Components”，输入“Y Component”为“-5000”，并勾选“Y Component”复选框，从而将集中力参数化。

4．求解

选择 Static Structural→Solution，右击“Solution”，选择“Solve”。



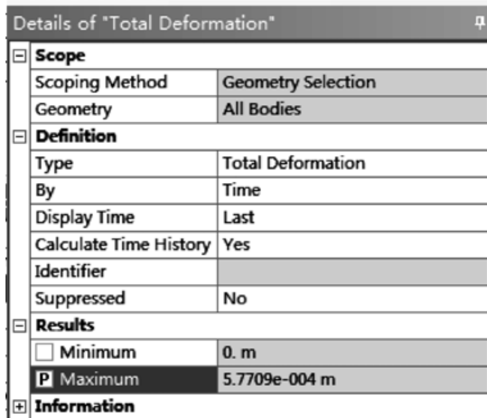
Details of "Force"

Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Face
Definition	
Type	Force
Define By	Components
Coordinate System	Global Coordinate System
X Component	0. N (ramped)
P Y Component	-5000. N (ramped)
Z Component	0. N (ramped)
Suppressed	No

图 35-9 “施加力细节”设置面板

5．提取最大变形和最大等效应力

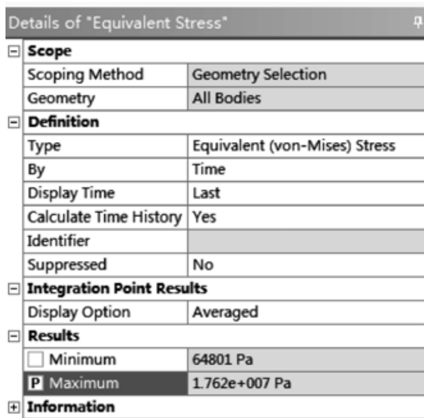
图 35-10 和图 35-11 分别给了“悬臂梁总体变形细节”和“悬臂梁等效应力细节”设置面板，用户分别将两个面板“Results”选项中的“Maximum”前方勾选，从而将悬臂梁的最大总体变形和最大等效应力进行了参数化，用于后续的优化设计。对于如何操作才能出现图 35-10 和图 35-11 所示的面板，读者可以参见本章的视频教程。



Details of "Total Deformation"

Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	All Bodies
Definition	
Type	Total Deformation
By	Time
Display Time	Last
Calculate Time History	Yes
Identifier	
Suppressed	No
Results	
Minimum	0. m
P Maximum	5.7709e-004 m
Information	

图 35-10 “悬臂梁总体变形细节”设置面板



Details of "Equivalent Stress"

Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	All Bodies
Definition	
Type	Equivalent (von-Mises) Stress
By	Time
Display Time	Last
Calculate Time History	Yes
Identifier	
Suppressed	No
Integration Point Results	
Display Option	Averaged
Results	
Minimum	64801 Pa
P Maximum	1.762e+007 Pa
Information	

图 35-11 “悬臂梁等效应力细节”设置面板

35.3.6 直接优化设计

1．建立直接优化设计分析系统

重新进入“Project Schematic”，将“Design' Exploration”中的“Direct Optimization”拖入如图 35-12 所示的位置，则建立了直接优化设计分析系统，由图可知直接优化设计分析系统由“Static Structural”“Parameter Set”和“Direct Optimization”组成，其中“Static

Structural”可以根据需要更换为模态分析、瞬态动力学分析等。

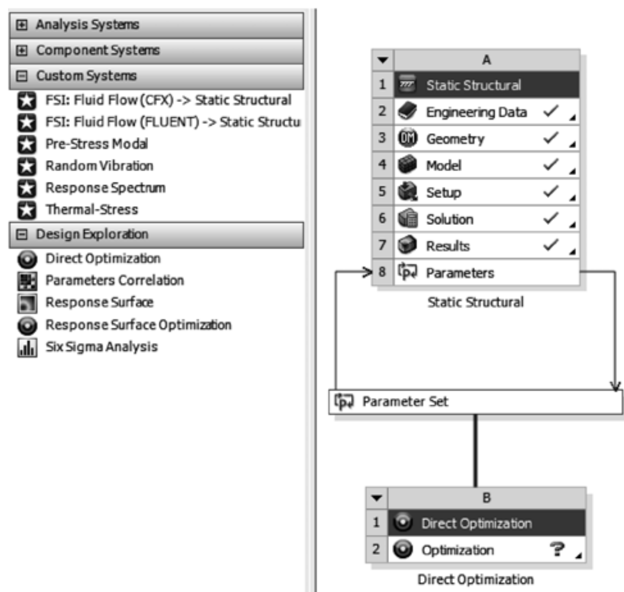


图 35-12　直接优化设计分析系统

2．查看设计参数

双击直接优化设计分析系统中的“Parameter Set”进入参数管理器，图 35-13 给出了参数管理器的主面板，由该图可知悬臂梁优化设计中输入参数包括 L、R1、R2、W 和 Force Y Component，输出参数包括 Solid Mass、Total Deformation Maximum 和 Equivalent Stress Maximum。

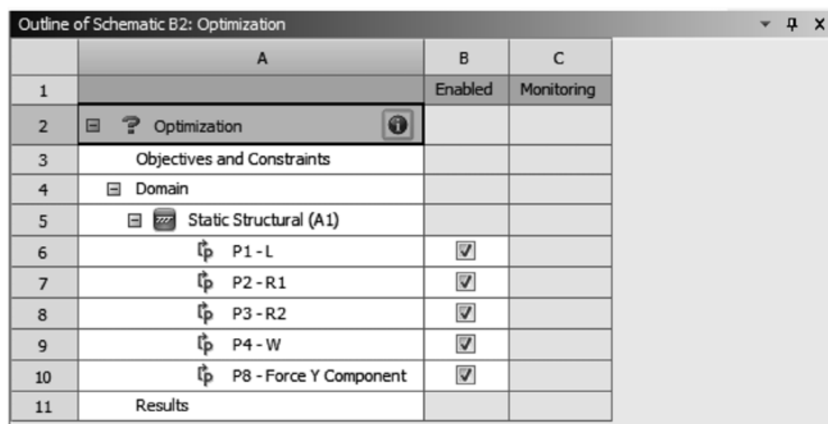
Outline: No data

	A	B	C	D
1	ID	Parameter Name	Value	Unit
2	Input Parameters			
3	Static Structural (A1)			
4	P1	L	0.7	
5	P2	R1	0.05	
6	P3	R2	0.05	
7	P4	W	0.1	
8	P8	Force Y Component	-5000	N
*	New input parameter	New name	New expression	
10	Output Parameters			
11	Static Structural (A1)			
12	P5	Solid Mass	199.62	kg
13	P6	Total Deformation Maximum	0.00057709	m
14	P7	Equivalent Stress Maximum	1.762E+07	Pa
*	New output parameter		New expression	
16	Charts			

图 35-13　参数管理器的主面板

3．进入优化设计模块

返回“Project Schematic”，双击“Optimization”进入优化设计模块，弹出如图 35-14 所示的“优化设计”设置面板，该面板由“Objectives and Constranints”“Domain”和“Results”组成。通过该面板用户可以设置优化设计的方法、优化设计中的设计变量、约束条件和目标函数以及设置输入参数的取值参数并可以查看优化设计结果。



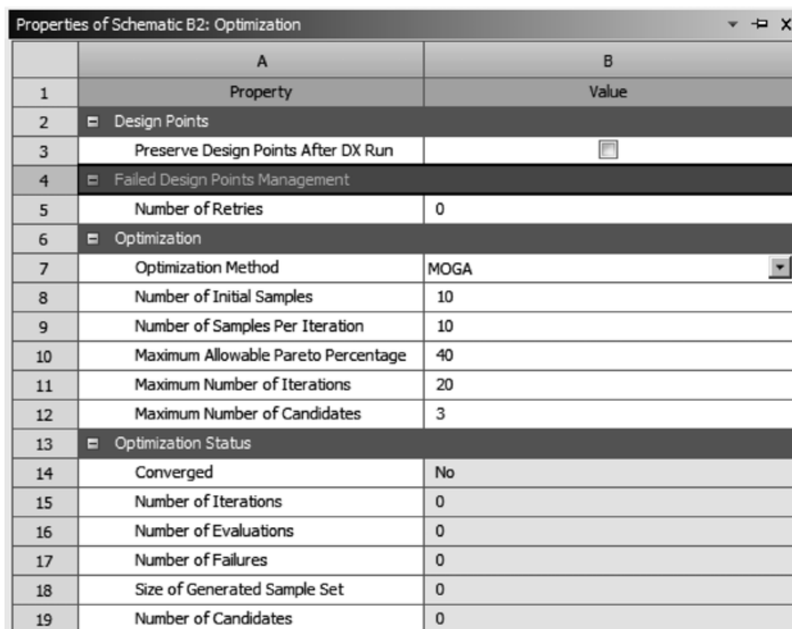
Outline of Schematic B2: Optimization

	A	B	C
1		Enabled	Monitoring
2	Optimization		
3	Objectives and Constraints		
4	Domain		
5	Static Structural (A1)		
6	P1 - L	☑	
7	P2 - R1	☑	
8	P3 - R2	☑	
9	P4 - W	☑	
10	P8 - Force Y Component	☑	
11	Results		

图 35-14 “优化设计”设置面板

（1）优化设计基本设置

选择优化设计面板中的“Optimazation”选项，则出现如图 35-15 所示的“优化设计基本”设置面板，该面板包括 4 个子选项：“Design Points”“Failed Design Points Management”“Optimization”和“Optimization Status”。



Properties of Schematic B2: Optimization

	A	B
1	Property	Value
2	Design Points	
3	Preserve Design Points After DX Run	☐
4	Failed Design Points Management	
5	Number of Retries	0
6	Optimization	
7	Optimization Method	MOGA
8	Number of Initial Samples	10
9	Number of Samples Per Iteration	10
10	Maximum Allowable Pareto Percentage	40
11	Maximum Number of Iterations	20
12	Maximum Number of Candidates	3
13	Optimization Status	
14	Converged	No
15	Number of Iterations	0
16	Number of Evaluations	0
17	Number of Failures	0
18	Size of Generated Sample Set	0
19	Number of Candidates	0

图 35-15 “优化设计基本设置”面板

这 4 个选项，用户一般只需设置优化设计方法即可，Workbench 提供了 6 种优化设计方法：Screening（筛选法），MOGA（多目标遗传算法），NLPQL（非线性二次规划算法），Adaptive Single-Objective（单目标自适应算法），Adaptive Multiple-Objective（多目标自适应算法）和 MISQP（混合整数序列二次规划算法）。本实例选用 MOGA，其他设置按照图 35-15 进行设置。

（2）定义优化目标函数和约束条件

单击“Objectives and Constrains”，则在面板的左侧出现如图 35-16 所示的“优化设计目标函数和约束条件”设置面板，用户按照图 33-16 所示进行设置。

Table of Schematic B2: Optimization

	A	B	C	D	E	F	G
1	Name	Parameter	Objective		Constraint		
2			Type	Target	Type	Lower Bound	Upper Bound
3	Seek P5 = 60 kg	P5 - Solid Mass	Seek Target	60	No Constraint		
4	Minimize P6; P6 <= 0.0025 m	P6 - Total Deformation Maximum	Minimize		Values <= Upper Bound		0.0025
5	Minimize P7; P7 <= 2E+08 Pa	P7 - Equivalent Stress Maximum	Minimize		Values <= Upper Bound		2E+08
6	P1	P1 - L	No Objective		No Constraint		
7	P2	P2 - R1	No Objective		No Constraint		
8	P3	P3 - R2	No Objective		No Constraint		
9	P4	P4 - W	No Objective		No Constraint		
10	Minimize P8	P8 - Force Y Component	Minimize		No Constraint		
*							

图 35-16 “优化设计目标函数和约束条件”设置面板

（3）设置输入变量的取值范围

单击“Domain”，则在面板左侧出现如图 35-17 所示的“设计域参数取值范围”设置面板，用户按照图 35-17 进行设置。

Table of Schematic B2: Optimization

	A	B	C
1	Optimization Domain	Lower Bound	Upper Bound
2	P1 - L	0.4	0.85
3	P2 - R1	0.01	0.08
4	P3 - R2	0.01	0.08
5	P4 - W	0.02	0.3
6	P8 - Force Y Component (N)	-3E+05	-5000

图 35-17 “设计域参数取值范围”设置面板

（4）开始计算

右击“Optimization”，选择“Update”，开始优化计算。

4．查看优化设计结果

图 35-18 给出了悬臂梁优化设计方案列表，图 35-19～图 35-22 分别给出了优化设计的二维权衡图、三维权衡图、样本图和输入变量的敏感度，图 35-23～图 35-26 分别给出了悬

臂梁方案 1 和方案 3、方案 4 对应的变形云图和等效应力云图，具体查看方法读者可以参见本章视频教程。

Table of Schematic B2: Optimization , Candidate Points

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	Reference	Name	P1 - L	P2 - R1	P3 - R2	P4 - W	P8 - Force Y Component (N)		P5 - Solid Mass (kg)		P6 - Total Deformation Maximum (m)		P7 - Equivalent Stress Maximum (Pa)	
2							Parameter Value	Variation from Reference	Parameter Value	Variation from Reference	Parameter Value	Variation from Reference	Parameter Value	Variation from Reference
3	○	Candidate Point 1	0.69196	0.03975	0.029308	0.26771	×× -33549	16.15%	××× 551.32	29.93%	★★★ 0.0014026	-35.63%	★★★ 4.7266E+07	-35.18%
4	○	Candidate Point 2	0.68558	0.03975	0.029286	0.25941	×× -40066	-0.14%	××× 534.22	25.90%	★★ 0.0017293	-20.63%	★★★ 5.7834E+07	-20.68%
5	◉	Candidate Point 3	0.68562	0.03975	0.029285	0.20604	×× -40011	0.00%	××× 424.31	0.00%	★ 0.0021788	0.00%	★★ 7.2916E+07	0.00%
*		New Custom Candidate Point	0.625	0.045	0.045	0.16	-1.5225E+05							

图 35-18　悬臂梁优化设计方案列表

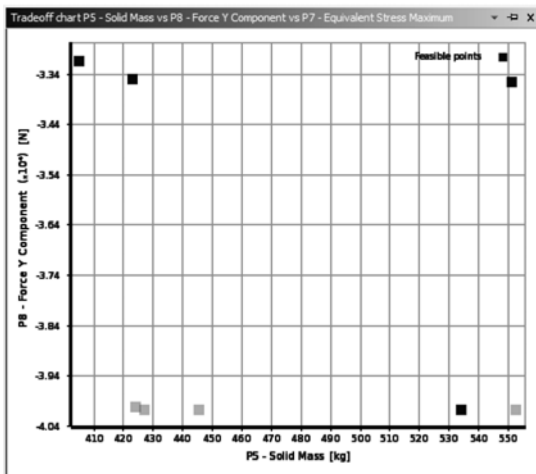


图 35-19　优化设计的二维权衡图

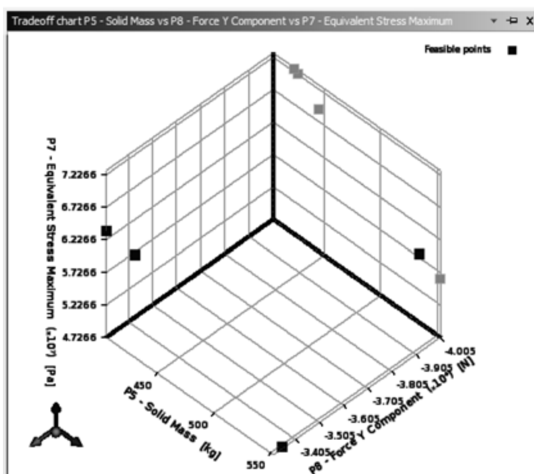


图 35-20　优化设计的三维权衡图

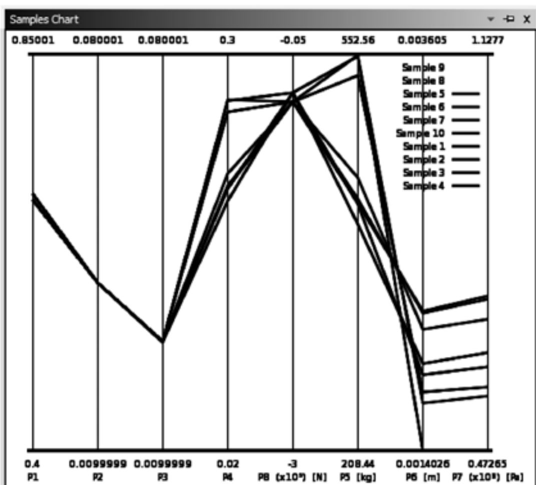


图 35-21　优化设计的样本图

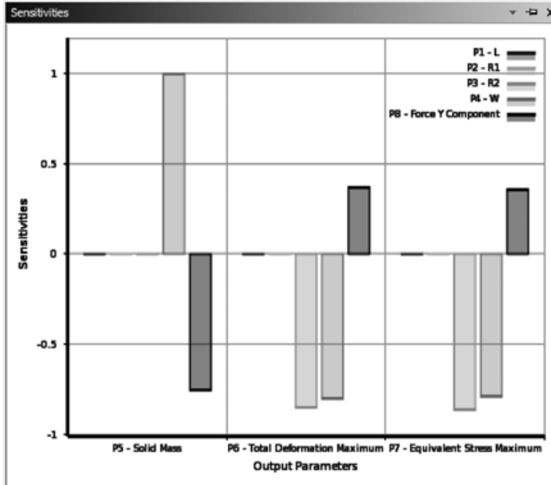


图 35-22　优化设计中的输入变量的敏感度

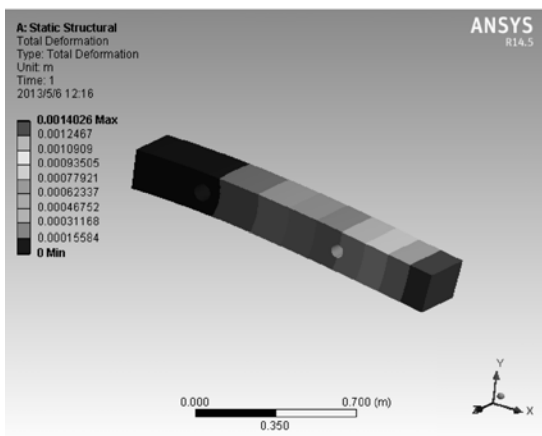


图 35-23　优化设计方案 1 对应的总体变形云图

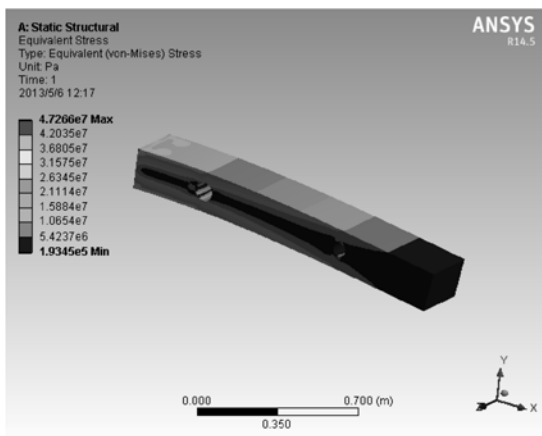


图 35-24　优化设计方案 1 对应的等效应力云图

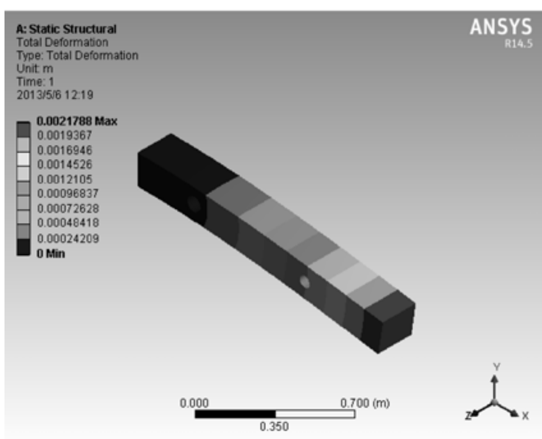


图 35-25　优化设计方案 3 对应的总体变形云图

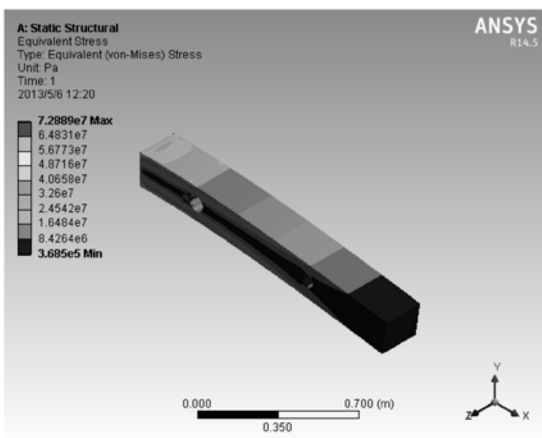


图 35-26　优化设计方案 4 对应的等效应力云图

第 36 例　点焊结构的有限元分析



36.1　实例覆盖的知识点

读者通过学习该实例可以掌握如下 Workbench 的知识点。

1）创建点焊连接的方法。

2）点焊连接参数的详解。

3）点焊结构静力学分析步骤。

36.2　问题的描述

36.2.1 几何模型

图 36-1 给出了点焊结构的分析模型，该模型由两块钢板组成，在两块钢板的重叠区域设置点焊连接。

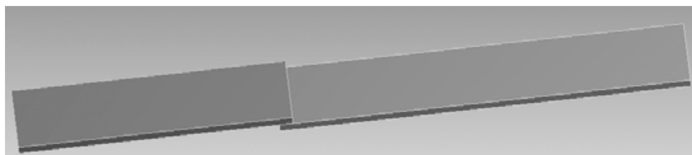


图 36-1　点焊结构分析模型

36.2.2 材料参数

两块钢板的材料参数相同，其弹性模量为 2.12E11Pa，泊松比为 0.31。

36.2.3 边界条件和载荷

完全固定较短钢板的侧面，在较长钢板的另一个侧面施加一个拉力，大小为 1E4N。

36.3　GUI 操作

36.3.1 创建点焊连接

1．激活 DM 模块

启动 Workbench，双击 Workbench 中“Toolbox”组件系统中的“Geometry”，则在

“Project Schembc”中出现 DM 模块。

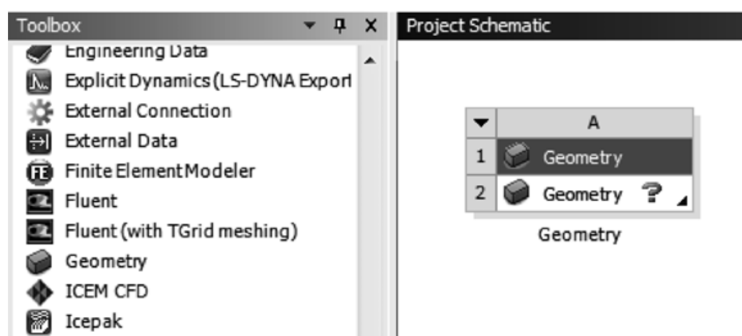


图 36-2　DM 分析系统

2．导入模型

如图 36-3 所示，右击“Gemoetry”，选择 Import Geometry→Browse，打开工作目录文件夹，选择“Spot welding”模型文件，单击“OK”按钮。

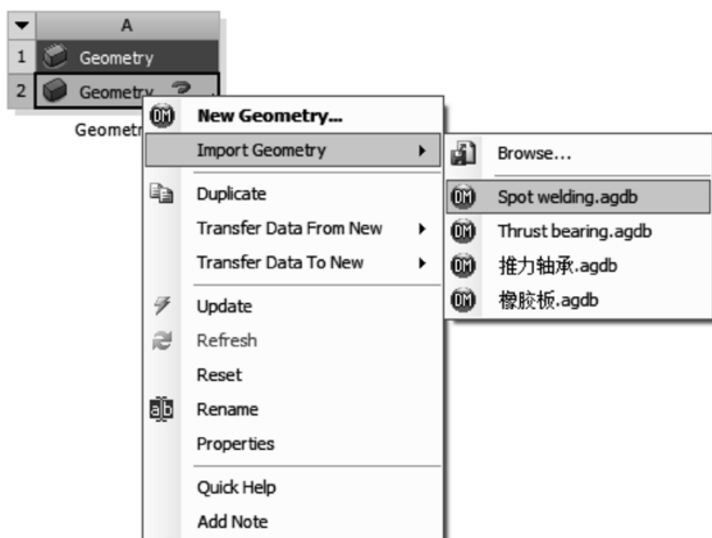


图 36-3　导入模型

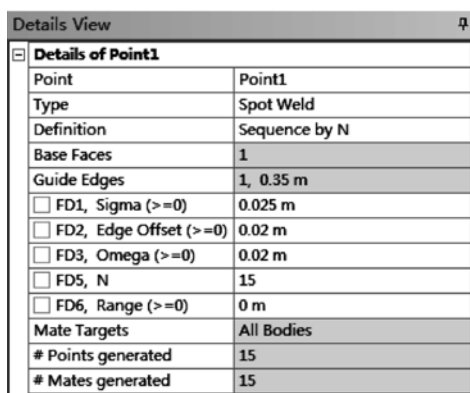
3．创建点焊连接

双击“Gemoetry”进入 DM 模块，然后按照以下路径操作：选择 File→Create→Point，则在细节创建出现如图 36-4 所示的“点焊连接细节”设置面板，图 36-5 给出了点焊连接示意图，按照图 36-5 选择“Base Faces”，单击“Apply”按钮，选择“Guide Edges”，单击“Apply”按钮，设置“Sigma”为“0.025”，“Eddge Offset”为“0.02”，“Omega”为“0.02”，“N”为“15”，“Range”为“0”，然后单击“Generate”生成点焊连接。

下面给读者解释一下点焊连接设置中参数的含义。

Based Face：点焊所在的基面；Guide Edge：距离生成的那排点焊比较近的参考边；Sigma：第一个点焊距离板边缘的距离；Edge offset：生成的那排点焊距离 Guide Edge 的距

离；Omega：点焊与点焊的距离；N：点焊的总数；Range: 板与板的 Z 向距离；Mate Target：与 Base face 相对的面。



Details View

Details of Point1	
Point	Point1
Type	Spot Weld
Definition	Sequence by N
Base Faces	1
Guide Edges	1, 0.35 m
FD1, Sigma (>=0)	0.025 m
FD2, Edge Offset (>=0)	0.02 m
FD3, Omega (>=0)	0.02 m
FD5, N	15
FD6, Range (>=0)	0 m
Mate Targets	All Bodies
# Points generated	15
# Mates generated	15

图 36-4 “点焊连接细节”设置面板

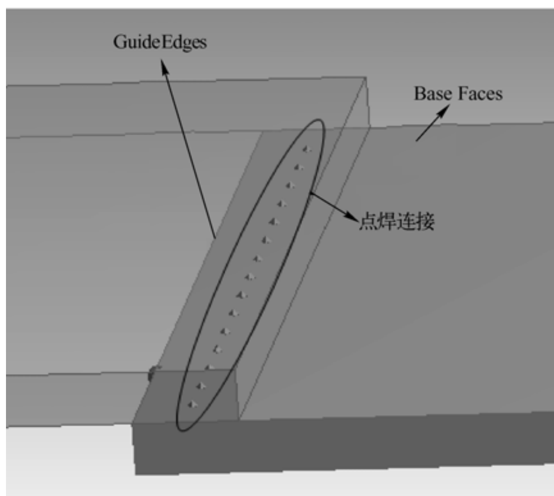


图 36-5 点焊连接示意图

36.3.2 创建静力学分析系统

将“Static Structural”拖入到“Project Schematic”，然后使用鼠标将 A 和 B 中的“Gemetry”连接起来，则 A 中几何模型传递到了静力学分析系统中，图 36-6 给出了“静力学分析系统”工程图。

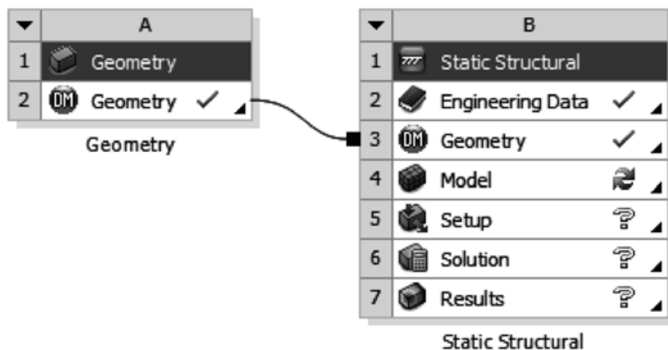


图 36-6 “静力学分析系统”工程图

36.3.3 定义材料数据

单击静态结构分析系统中的“Engineering Data”子模块，选择“Structural Steel”上的结构钢选项，弹出如图 36-7 所示的“结构钢材料”数据表，将杨氏模量修改为“2.1E11”，泊松比改为“0.31”，然后单击“Return to Project”按钮。

Properties of Outline Row 3: Structural Steel

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Density	7850	kg m^-3		
3	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion				
4	Coefficient of Thermal Expansion	1.2E-05	C^-1		
5	Reference Temperature	22	C		
6	Isotropic Elasticity				
7	Derive from	Young's ...			
8	Young's Modulus	2.12E+11	Pa		
9	Poisson's Ratio	0.31			
10	Bulk Modulus	1.8596E+11	Pa		
11	Shear Modulus	8.0916E+10	Pa		
12	Alternating Stress Mean Stress	Tabular			
13	Interpolation	Log-Log			
14	Scale	1			

图 36-7 “结构钢材料”数据表

36.3.4 创建有限元模型

选择静力学分析系统中的“Modal”选项，进入静力学分析系统，图 36-8 给出了“静力学分析系统”流程图，由图可知在“Connections”下方出现了 15 个点焊连接，说明刚才在 DM 创建的点焊连接是成功的。

1．为点焊结构赋予材料

单击 Model→Geometry→Solid，则弹出如图 36-9 所示的“点焊结构材料细节”设置面板，用户一般只需设置该面板的两个子选项，即“Definition”和“Material”选项。在“Definition”选项中，用户可以设置模型的“Stiffness Behavior”“Coordinate System”和“Reference Temperature”，在“Material”选项中可以为模型指定“Assignment”，本实例选用材料为“Structural Steel”。

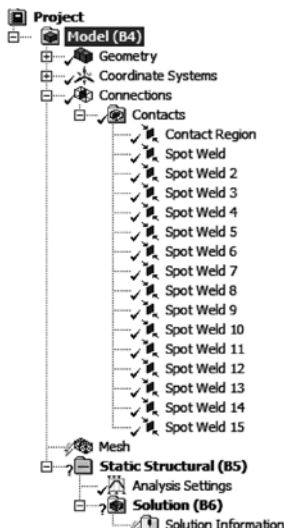


图 36-8 “静力学分析系统”流程图

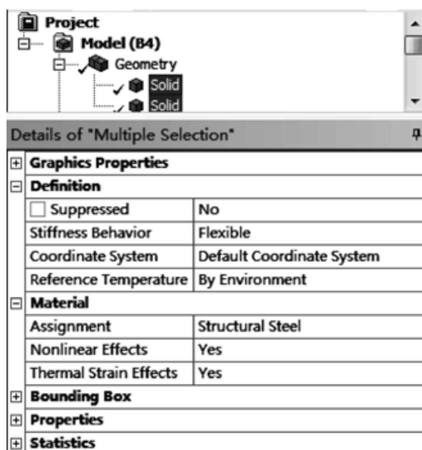
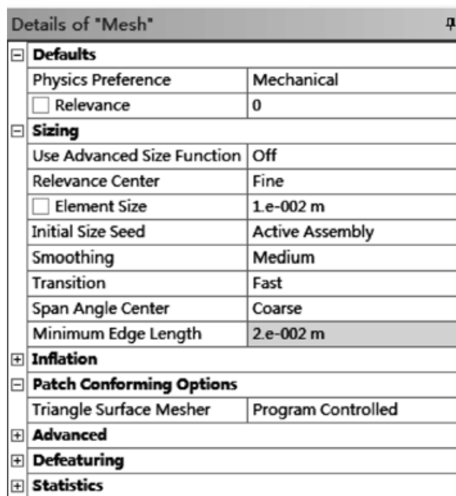


图 36-9 “点焊结构材料细节”设置面板

2．网格划分

单击“Mesh”，弹出如图 36-10 所示的“网格划分细节”设置面板，设置“Relevance Center”为“Fine”，设置“Element Size”为“0.01”，其他保持默认设置，然后右击“Mesh”，选择“Generate Mesh”。



Details of "Mesh"

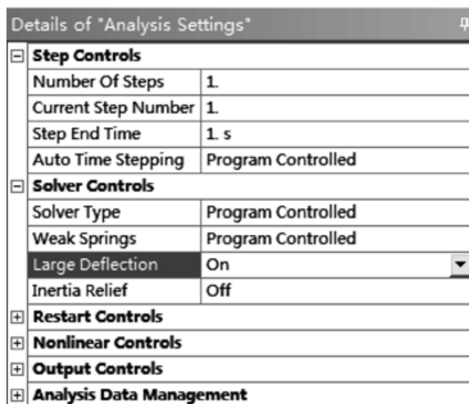
Defaults	
Physics Preference	Mechanical
Relevance	0
Sizing	
Use Advanced Size Function	Off
Relevance Center	Fine
Element Size	1.e-002 m
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	Medium
Transition	Fast
Span Angle Center	Coarse
Minimum Edge Length	2.e-002 m
Inflation	
Patch Conforming Options	
Triangle Surface Mesher	Program Controlled
Advanced	
Defeaturing	
Statistics	

图 36-10 “网格划分细节”设置面板

36.3.5 静力学分析

1．静力学分析设置

单击“Static Structural”下方的“Analysis Settings”，则会出现如图 36-11 所示的“静力学求解分析细节”设置面板，设置“Large Deflection”为“On”，表明激活了大变形。



Details of "Analysis Settings"

Step Controls	
Number Of Steps	1.
Current Step Number	1.
Step End Time	1. s
Auto Time Stepping	Program Controlled
Solver Controls	
Solver Type	Program Controlled
Weak Springs	Program Controlled
Large Deflection	On
Inertia Relief	Off
Restart Controls	
Nonlinear Controls	
Output Controls	
Analysis Data Management	

图 36-11 “静力学分析细节”设置面板

2．施加固定约束

右击“Static Structural”，选择 Insert→Fixed Support，则在细节窗口出现如图 36-12 所示的“固定约束细节”设置面板，选择点焊结构的一个端面，单击“Apply”按钮。

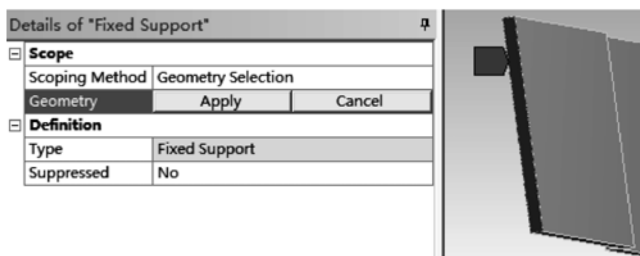


图 36-12 “固定约束细节”设置面板

3．施加力

右击“Static Structural”，选择 Insert→Force，则在细节窗口出现如图 36-13 所示的“力细节”设置面板，选择点焊结构的另一个端面，单击“Apply”按钮，设置施加力的方式为“Components”，输入“X Component”为“10000”。

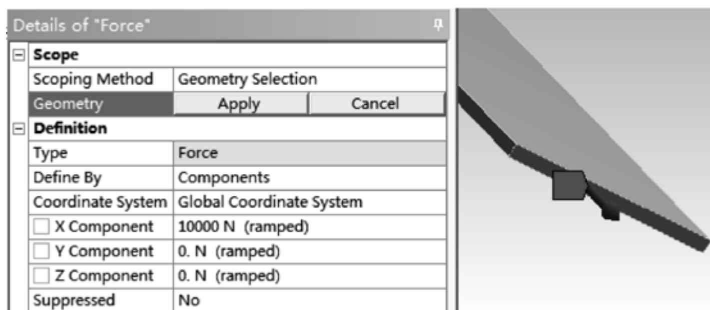


图 36-13 “力细节”设置面板

4．求解

选择 Static Structural→Solution，右击“Solution”，选择“Solve”。

5．观察结果

图 36-14 和图 36-15 分别给出了点焊结构的总体变形云图和等效应力云图，具体查看方法读者可以参见本章视频教程。

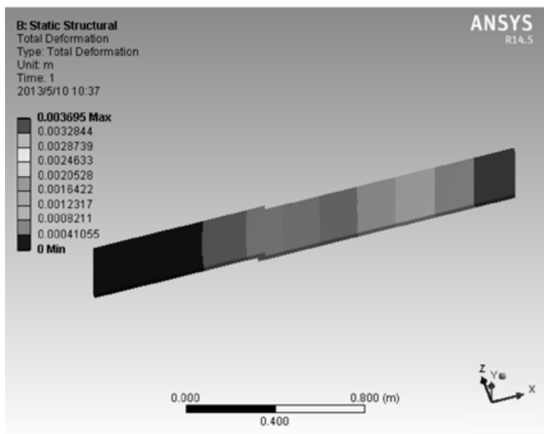


图 36-14 点焊结构的总体变形云图

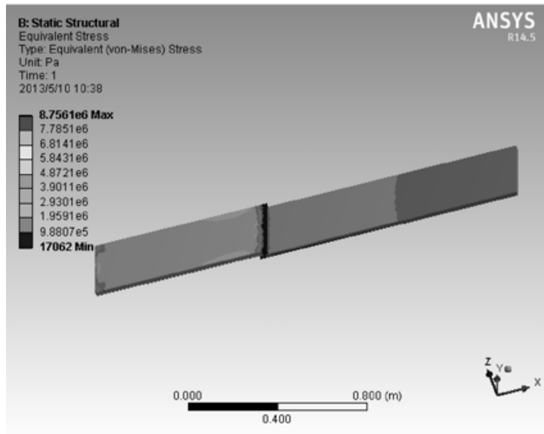


图 36-15 点焊结构的等效应力云图

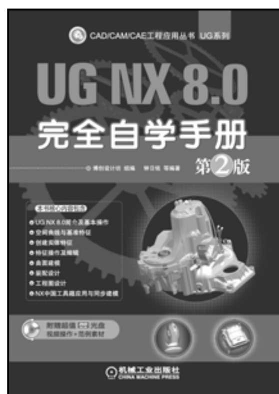
CAD/CAM/CAE 工程应用丛书

打造 CAD 图书领域的“中国制造”

丛书特色

- **历久弥新**：为响应国家“两化融合”的号召，机工社历经十年倾力打造本系列丛书，丛书每年重印率达 90%、改版率达 50%，已成为国内 CAD 图书领域的最经典套系之一。
- **专业实用**：丛书内容涉及机械设计、有限元分析、制造技术应用、流场分析、建筑施工图、室内装潢图、水暖电布线图和建筑总图等，可以快速有效地帮助读者解决实际工程问题。
- **品种丰富**：本丛书目前动销品种近 200 种，产品包含了 CAX 领域全部主流应用软件和应用领域，包括 AutoCAD，UG，Pro/E，MATLAB，SolidWorks，HyperWorks，ANSYS，Mastercam，Inventor 等。
- **经典畅销**：经典畅销书层出不穷，累计销售过万册的品种达数十种。像《AutoCAD 室内装潢设计》、《UG NX 7.5 完全自学手册》、《Pro/ENGINEER Wildfire5.0 从入门到精通》、《ANSYS 结构分析工程应用实例解析》等书整体销量已过 3 万册。
- **配套资源丰富**：几乎每本书都提供配有书中实例素材、操作视频、PPT 课件等资源，方便读者的理解和学习，以达到事半功倍的效果。
- **金牌作者云集**：拥有一大批行业专家和畅销书作者，如唐湘民、韩凤起、钟日铭、江洪、张朝晖和张忠将等。

丛书介绍



书名：UG NX 8.0完全自学手册 第2版

书号：978-7-111-38414-4

作者：钟日铭 等

定价：75.00元

★本书以UG NX 8.0中文版为软件操作基础，结合典型范例循序渐进地介绍NX 8.0中文版的软件功能和实战应用知识。本书知识全面、实用，共分9章，内容包括UG NX 8.0入门简介及基本操作、草图、空间曲线与基准特征、创建实体特征、特征操作及编辑、曲面建模、装配设计、工程图设计、UG NX中国工具箱应用与同步建模。



书名：SolidWorks 2011机械设计完全实例教程

书号：978-7-111-36514-3

作者：张忠将 等

定价：62.00元

★本书紧密结合实际应用，以众多精彩的机械设计实例为引导，详细介绍了SolidWorks从模型创建到出工程图，再到模型分析和仿真等的操作过程。本书实例涵盖典型机械零件、输送机械、制动机械、农用机械、紧固和夹具、传动机构和弹簧／控制装置等的设计。



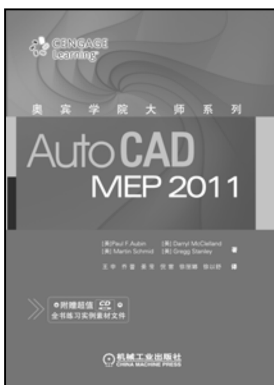
书名：HyperMesh&HyperView应用技巧与高级实例

书号：978-7-111-39535-5

作者：王钰栋 等

定价：99.00元

★本书分两部分，前一部分主要介绍HyperMesh有限元前处理软件，包括HyperMesh的基础知识、几何清理、2D网格划分、3D网格划分、1D单元创建、航空应用和主流求解器接口介绍，还包括关于HyperMesh的用户二次开发功能。后一部分主要介绍HyperView、HyperGraph等有限元后处理软件，包括用HyperView查看结果云图、变形图、结果数据、创建截面、创建测量点、报告模板等，用HyperGraph建立数据曲线、曲线的数据处理和三维曲线曲面的创建、处理等。



书名：奥宾学院大师系列：AutoCAD MEP 2011

书号：978-7-111-39432-7

作者：[美]Paul F. Aubin 等著；王申 等译

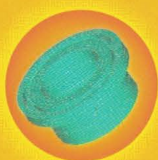
定价：129.00元

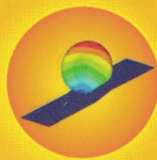
★本书是目前国内针对 AutoCAD®MEP 软件介绍、应用举例的权威用书，深入浅出地阐述了 AutoCAD®MEP 2011 的各项功能，对 AutoCAD MEP 软件的工作方法、基本原理和操作步骤进行了详细的介绍，并通过项目样例系统地介绍了如何使用该软件进行水、暖、电设计，更简明扼要地展示了如何进行各专业之间的协同。本书还特别介绍了如何创建各种类型的内容构件，字里行间的提示和小技巧亦是本书亮点之一，这些知识点均由本书作者通过积累多年的实战经验总结而成，为广大读者的实践旅程提供了捷径。

在线互动交流平台

官方微博：http://weibo.com/cmpjsj
豆 瓣 网：http://site.douban.com/139085/
读者信箱：cmp_itbook@163.com

ANSYS Workbench 14.5 数值模拟工程实例解析



SolidWorks系列
AutoCAD系列
Creo系列
UG系列
CATIA系列
MATLAB系列
ANSYS系列
Mastercam系列

>>》>ANSYS系列已出版<《<<

- ANSYS Workbench 14.5数值模拟工程实例解析
- ANSYS 14.0/FLOTRAN理论解析与工程应用实例
- ANSYS 14.0 工程实例解析与常见问题解答
- ANSYS 14.0 理论解析与工程应用实例
- ANSYS 13.0 流场分析技术及应用实例
- ANSYS 13.0与HyperMesh 11.0联合仿真有限元分析
- FLUENT 6.3 流场分析从入门到精通
- 有限元分析——ANSYS 13.0从入门到实战
- ANSYS 12.0 土木工程应用实例解析
- ANSYS 12.0 有限元分析与范例解析
- ANSYS 12.0 结构分析工程应用实例解析 第3版
- ANSYS 11.0 结构分析工程应用实例解析 第2版
- ANSYS 8.0 结构分析及实例解析

地址：北京市百万庄大街22号
邮政编码：100037
电话服务
社服务中心：010-88361066
销售一部：010-68326294
销售二部：010-88379649
读者购书热线：010-88379203
网络服务
教材网：http://www.cmpedu.com
机工官网：http://www.cmpbook.com
机工官博：http://weibo.com/cmp1952
封面无防伪标均为盗版

上架指导 计算机/辅助设计
ISBN 978-7-111-44013-0
策划编辑◎ 张淑谦/ 封面设计◎


ISBN 978-7-111-44013-0


定价：72.00元（含1DVD）